

中華民國第 53 屆中小學科學展覽會
作品說明書

國中組 生物科

最佳創意獎

030320

歷歷在目－深入探討負片後像與相關視錯覺

學校名稱：臺中市立長億高級中學(附設國中)

作者： 國二 王鍵錕 國二 林翌婷	指導老師： 蘇毓智
---------------------------------	------------------

關鍵詞：負片後像、視錐細胞、視錯覺

摘要

為探討視覺疲勞產生的負片後像及相關視錯覺。我們標準化觀察情境，並將色彩以光的三原色 RGB 在電腦螢幕上的數值加以定義。

研究發現，負片顏色可用計算的方法預估，實驗加權後的顏色接近理論值，且觀察的時間越久，顏色越深，視覺疲勞的比例也越高，疲勞比例依序為藍>綠>紅；黑底時負片顏色不易判斷；改變底色會使負片顏色疊加底色；單眼觀察的視覺疲勞比例高於雙眼觀察。

旋轉球實驗，加引導十字可使看到的人次提高，改變底色時，顏色接近底色；鬼影效果依序為正方形>傾斜 45 度角>三角形>六角形；方塊顏色的影響依序為黑白>藍>紅>綠，可能與和底色的灰階值差有關，此數值與看到人次相關；此外，盲點處也有負片後像，但可能是大腦想像出來的。

壹、研究動機

國一生物課時，老師帶我們觀察各種負片後像的圖片，令我們覺得非常有趣，卻意外發現—怎麼有些人看得到，有些人卻看不到，有的人看到的顏色卻與「標準答案—紅→綠、黃→紫」不同呢？這使我們感到好奇，標準答案是否正確？每個人的視覺是否都相同？負片後像的產生是否存在個別差異？

我們知道，負片後像是感覺疲勞的一種，起因於長時間的視覺刺激興奮引起視網膜上的視覺神經—視錐細胞和視桿細胞（圖 1）疲勞，造成對色彩的感覺靈敏度降低，當視線轉移後，會留下原本影像的殘像，但色彩會改變成為原色的「互補色」。此外，當圖片中出現陰影、色差、負片後像等因素時，透過大腦對視覺訊息的判讀，更可能出現「視錯覺」的產生。

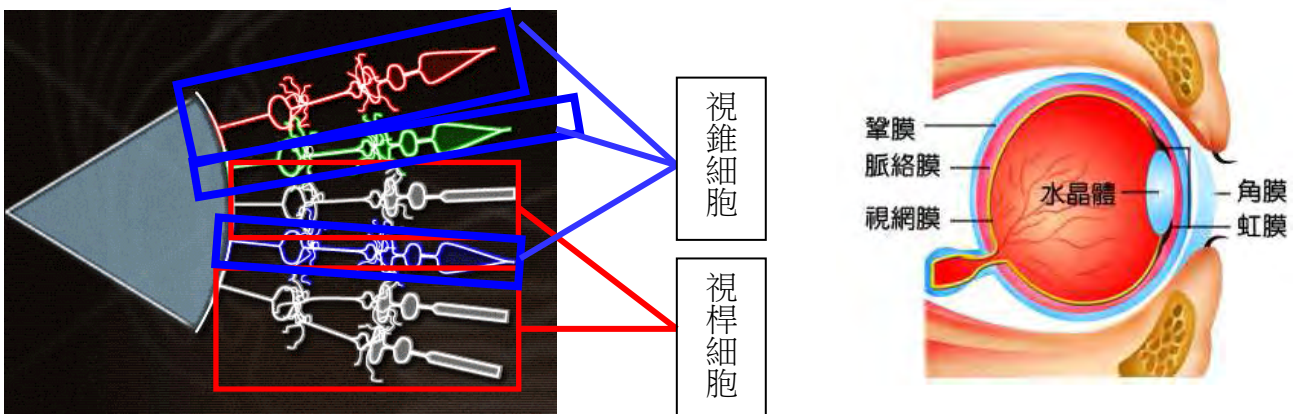


圖 1、人類的眼球構造與視錐、視桿細胞（網路圖片）

在本實驗中，我們假設人的視覺可能存在個別及條件差異，嘗試設計出標準化的觀察環境，並以光的三原色—R 紅、G 綠、B 藍在電腦螢幕上的數值定義所有的顏色及選項，我們針對負片後像的顏色、旋轉球、鬼影的產生、盲點處的負片後像等進行多達 80 多項的實驗設計深入探討，每個實驗都有 30 多筆樣本數據累積，試圖找出規律性及原因。

貳、研究目的

- 一、 負片後像的顏色探討
 - (一) 各種顏色（白底）的負片後像
 1. 顏色：紅、綠、藍、黃、紫、橘、黑
 2. 觀察時間：5 秒、10 秒、30 秒
 3. 負片後像的亮度
 - (二) 背景顏色對負片後像的影響
 1. 黑底
 2. 紅、綠、藍底
 3. 黑球白底、白球黑底
 - (三) 單眼觀察對負片後像的影響
- 二、 負片後像與視錯覺
 - (一) 旋轉球
 1. 顏色
 2. 轉速
 3. 背景
 4. 提示十字
 - (二) 方塊與鬼影
 1. 顏色：黑、紅、綠、藍、白
 2. 形狀：正方形、三角形、六角形
 3. 傾斜：正方形傾斜 45 度
 - (三) 盲點處是否會產生負片後像

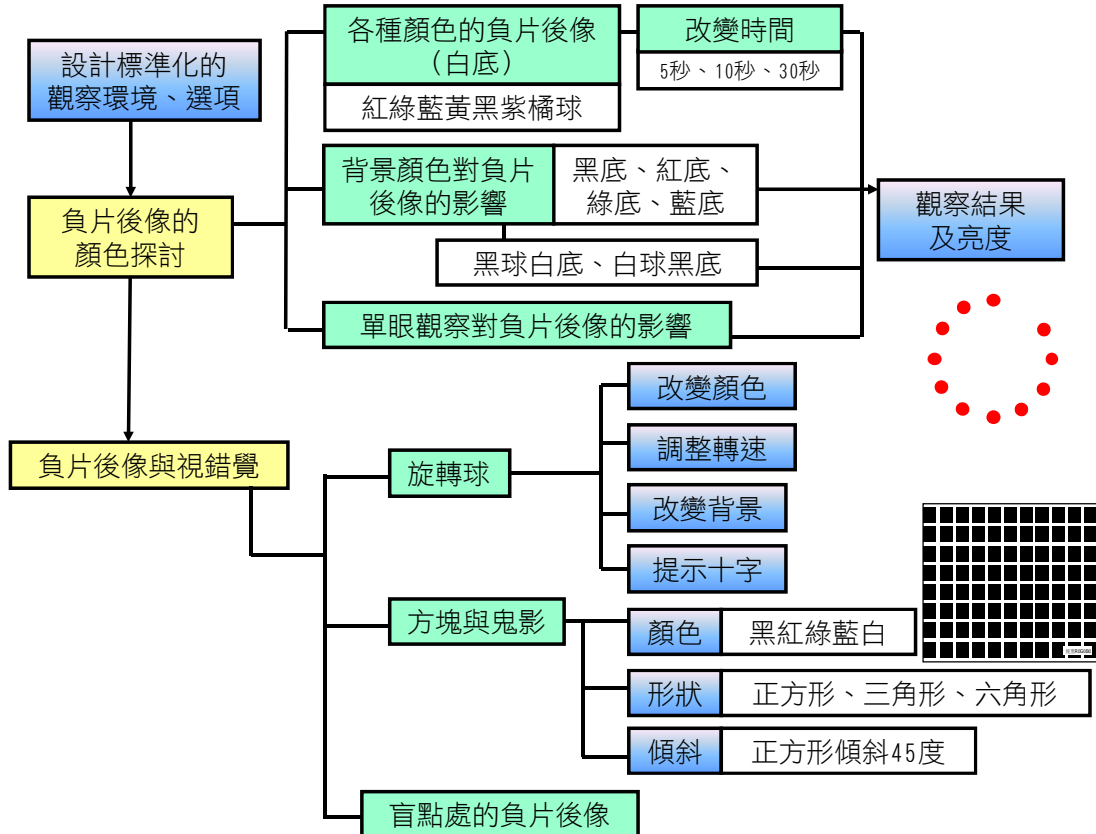


圖 2、實驗架構圖

參、研究設備及器材

- 一、硬體部分：電腦設備、紙箱、黑色壁報紙、黑色垃圾袋
- 二、軟體部分（學校購買的正版軟體）：Photoshop、Coreldraw、Microsoft PowerPoint

肆、研究過程或方法

- 一、設計標準化的觀察環境（圖 3）
 - （一）取一個適當大小的紙箱(長 44.5 公分、寬 60 公分)
 - （二）將紙箱內貼滿黑紙（阻擋光線）
 - （三）在紙箱外黏上黑色垃圾袋
 - （四）測試方法
 1. 請受試者距離 30 公分。
 2. 電腦螢幕角度 90 度。
 3. 以紙箱罩住頭、手、電腦。
 4. 眼睛直視電腦螢幕。

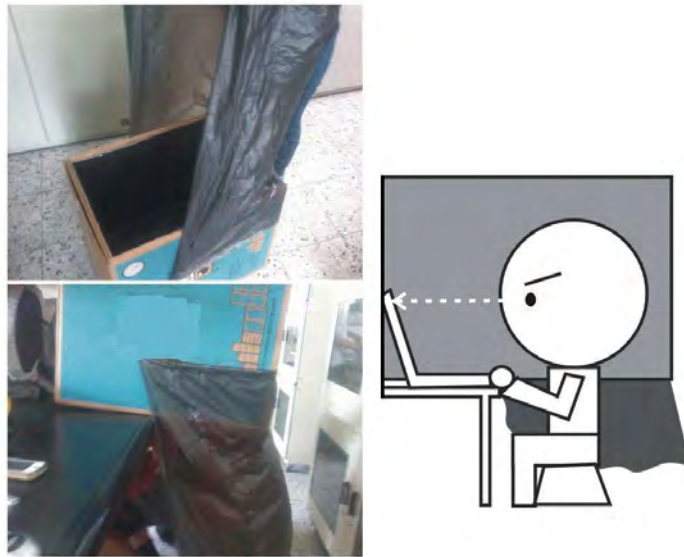


圖 3、標準化觀察環境

（五）實驗流程

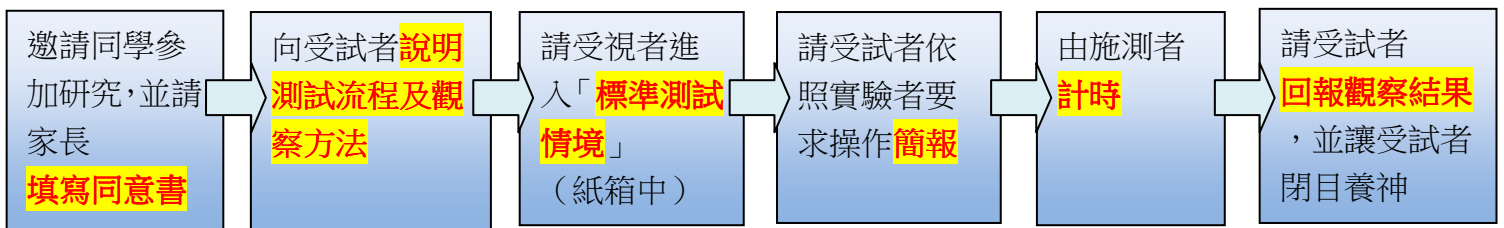


圖 4、實驗流程

二、實驗設計

(一) 色彩定義

a. 利用 RGB 三原色定義顏色																			
b. 擷取所有顏色的色票，並將顏色加以定義																			
c. 將上述色票區分為 18 個不同色塊，每個顏色也都以 RGB 定義																			
R	0	0	0	0	85	170	255	255	255	255	255	255	255	170	85	0	0	0	0
G	255	170	85	0	0	0	0	0	0	0	85	170	255	255	255	255	255	255	255
B	255	255	255	255	255	255	255	170	85	0	0	0	0	0	0	0	85	170	255
d. 設計顏色調亮 20% 的色票選項 = $(255 - \text{原數字}) \times (0.2) + \text{原數字}$																			
R	51	51	51	51	119	187	255	255	255	255	255	255	255	187	119	51	51	51	51
G	255	187	119	51	51	51	51	51	51	51	119	187	255	255	255	255	255	255	255
B	255	255	255	255	255	255	255	187	119	51	51	51	51	51	51	51	119	187	255
e. 設計顏色調亮 40% 的色票選項 = $(255 - \text{原數字}) \times 0.4 + \text{原數字}$																			
R	102	102	102	102	153	204	255	255	255	255	255	255	255	204	153	102	102	102	102
G	255	204	153	102	102	102	102	102	102	102	153	204	255	255	255	255	255	255	255
B	255	255	255	255	255	255	255	204	153	102	102	102	102	102	102	102	153	204	255
f. 設計顏色調亮 60% 的色票選項 = $(255 - \text{原數字}) \times 0.6 + \text{原數字}$																			
R	153	153	153	153	187	221	255	255	255	255	255	255	255	221	187	153	153	153	153
G	255	221	187	153	153	153	153	153	153	153	187	221	255	255	255	255	255	255	255
B	255	255	255	255	255	255	255	221	187	153	153	153	153	153	153	153	187	221	255
g. 設計顏色調亮 80% 的色票選項 = $(255 - \text{原數字}) \times 0.8 + \text{原數字}$																			
R	204	204	204	204	221	238	255	255	255	255	255	255	255	238	221	204	204	204	204
G	255	238	221	204	204	204	204	204	204	204	221	238	255	255	255	255	255	255	255
B	255	255	255	255	255	255	255	238	221	204	204	204	204	204	204	204	221	238	255
h. 設計顏色調亮 90% 的色票選項 = $(255 - \text{原數字}) \times 0.9 + \text{原數字}$																			
R	230	230	230	230	238	247	255	255	255	255	255	255	255	247	238	230	230	230	230
G	255	247	238	230	230	230	230	230	230	230	238	247	255	255	255	255	255	255	255
B	255	255	255	255	255	255	255	247	238	230	230	230	230	230	230	230	238	247	255
i. 設計顏色調暗三分之一的色票選項 = $\text{原數字} \times (2/3)$																			
R	0	0	0	0	57	113	170	170	170	170	170	170	170	113	57	0	0	0	0
G	170	113	57	0	0	0	0	0	0	0	57	113	170	170	170	170	170	170	170
B	170	170	170	170	170	170	170	113	57	0	0	0	0	0	0	0	57	113	170
j. 設計顏色調暗三分之二的色票選項 = $\text{原數字} \times (1/3)$																			
R	0	0	0	0	28	57	85	85	85	85	85	85	85	57	28	0	0	0	0
G	85	57	28	0	0	0	0	0	0	0	28	57	85	85	85	85	85	85	85
B	85	85	85	85	85	85	85	57	28	0	0	0	0	0	0	0	28	57	85

表 1、實驗選項色票設計

(二) 負片後像的顏色探討

我們假設：負片後像的產生是由於視錐細胞發生感覺疲勞，導致對於光線產生辨識錯誤，因此理論上眼睛看到的負片後像就是拿白光減去感覺疲勞的色光。

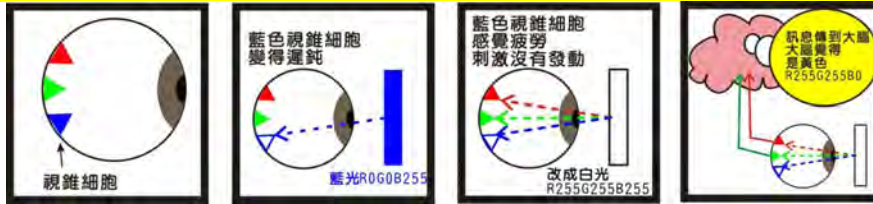


圖 5、以藍球白底為例：假設負片後像的產生是由於視錐細胞發生感覺疲勞，導致對於光線產生辨識錯誤

1. 觀察圖形的設計：

- (1) 在 PowerPoint 開 3 個新頁面，第一個頁面留白作為起始頁面
- (2) 第二頁畫一個圓，填入顏色，且顏色以 R、G、B 混色並以數值處理
例如：**紅 R255 G0 B0**、**綠 R0 G255 B0**、**藍 R0 G0 B255**

2. 選項設計：

- (1) 第 3 個頁面，畫 8 個圓，在 7 個圓當中填入選項色彩
- (2) 白底的負片後像顏色實驗選項設計：我們將 255 減去原圖形的 RGB 值作為我們假設的互補色理論值（4 號），再將該顏色在我們的色票中左右各推三色（表 1-c），最後一個圓不填色代表沒看到

$$\begin{aligned} \text{負片理論值 } R &= 255 - \text{原圖形 } R \\ \text{負片理論值 } G &= 255 - \text{原圖形 } G \\ \text{負片理論值 } B &= 255 - \text{原圖形 } B \end{aligned}$$

選項	1 號	2 號	3 號	4 號 理論值	5 號	6 號	7 號	8 號
RGB	R255G0B0	R255G85B0	R255G170B0	R255G255B0	R170G255B0	R85G255B0	R0G255B0	沒看到

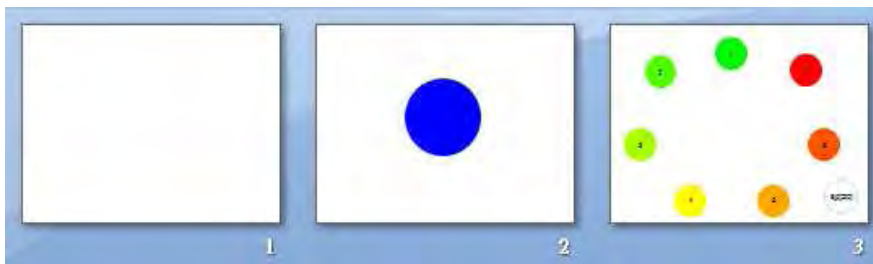


圖 6、以藍球白底為例：左為起始頁面，中為測試頁面，右為選項頁面

- (3) 白底的負片後像亮度實驗選項設計：以前一個實驗負片後像顏色（RGB）最接近值作為 1 號選項，再依次調亮 20%、40%、60%、80%、90% 作為其他選項（ R' G' B' ）最後一個選項不填色代表沒看到，但這個沒看到的選項我們視為調亮 100%，R255G255B255。

$$\begin{aligned} R' &= R + (255 - R) \times (\text{調亮比例}) \\ G' &= G + (255 - G) \times (\text{調亮比例}) \\ B' &= B + (255 - B) \times (\text{調亮比例}) \end{aligned}$$

選項	1 號 理論值	2 號 調亮 20%	3 號 調亮 40%	4 號 調亮 60%	5 號 調亮 80%	6 號 調亮 90%	7 號
RGB	R255G255B0	R255G255B51	R255G255B102	R255G255B153	R255G255B204	R255G255B229	沒看到 R255G255B255

- (4) 黑球白底實驗選項設計:在確定實驗選項之前，先做一個前測，將大多數人的選擇做為選項設計。
- 看到亮亮的白球
 - 看到白球旁邊有大範圍陰影
 - 沒有看到東西

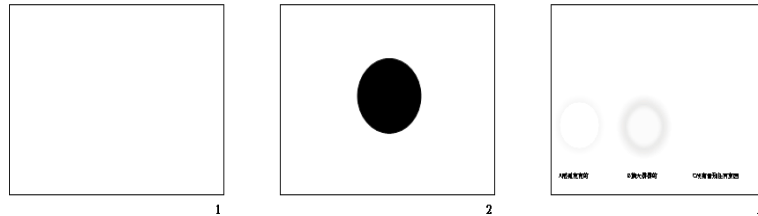


圖 7、黑球白底，左圖為起始頁面，中圖為測試頁面，右圖為選項頁面

- (5) 黑底的負片後像選項設計：以負片後像顏色最接近值調暗 2/3 作為選項（實驗已做過前測），再將該顏色在色票中左右各推三色（表 1-j），最後一個圓不填色代表沒看到。

$$R' = R \times (1/3)$$

$$G' = G \times (1/3)$$

$$B' = B \times (1/3)$$



圖 8、以藍球黑底為例：左圖為起始頁面，中圖為測試頁面，右圖為選項頁面

- (6) 白球黑底實驗選項設計:在確定實驗選項之前，先做一個前測，將大多數人的選擇做為選項設計。
- 看到黑球旁邊有灰色陰影
 - 看到黑球
 - 沒有看到

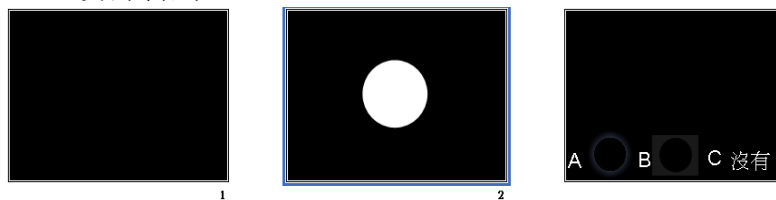


圖 9、白球黑底，左圖為起始頁面，中圖為測試頁面，右圖為選項頁面

- (7) 改變頁面底色：將 PowerPoint 頁面底色分別設定為紅、綠、藍三種底色，由於選項不易設計，我們先進行前測，讓觀察者自白色票中挑選顏色，再將大部分人觀察到的顏色設計成選項，進行正式測試。

3. 測試：請受測者進入標準化觀察環境中，播放 PowerPoint 簡報並計時，計間分別為 5 秒、10 秒、30 秒，並以口頭詢問結果並記錄。測試人數為 30 人以上。

(三) 負片後像與視錯覺

1. 旋轉球

- (1) 畫出 12 顆球圍成一個圈，將頁面複製 15 次，並依序減去一個球
- (2) 連續播放製成動畫，並設定換頁時間
- (3) 設定球的顏色、背景的颜色（顏色皆以 R、G、B 混色並以數值處理）、重複播放次數（將頁面複製數次貼上）

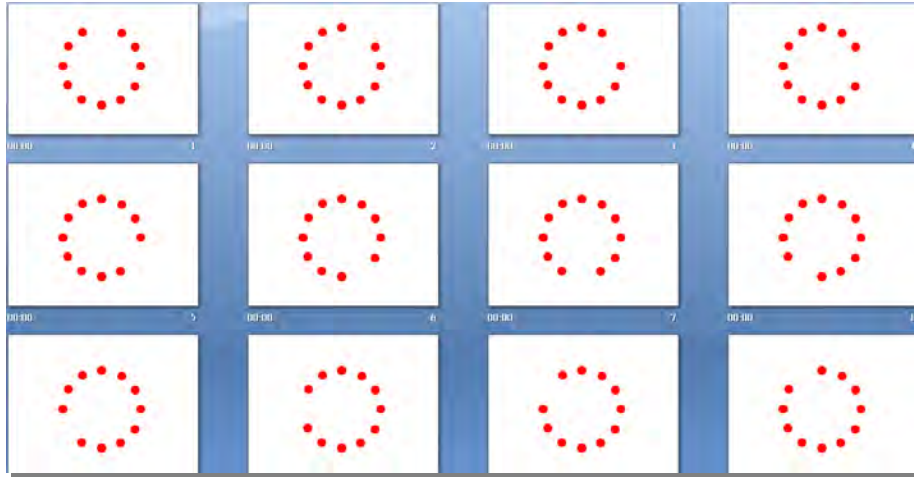


圖 10、旋轉球連續動畫分割（以紅球白底為例）

- (4) 在圖形中增加引導視覺的十字

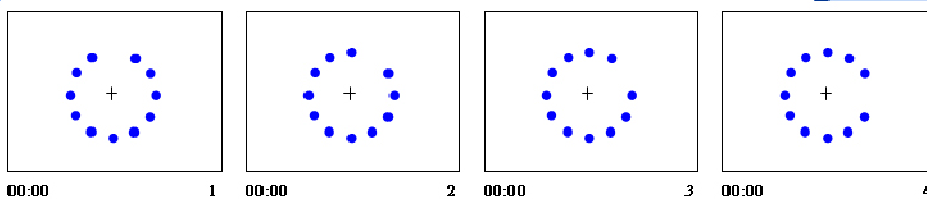


圖 11、旋轉球加十字，連續動畫分割（以藍球白底為例）

- (5) 選項設計：分為「未看到亮點閃動」、「有看到亮點閃動但無法分辨顏色」、「有看到亮點閃動且可分辨顏色」
 - (6) 測試：請受測者進入標準化觀察環境中，播放 PowerPoint 簡報，以口頭詢問結果並記錄。測試人數為 30 人以上。
2. 製作鬼影圖（正方形、三角形、六角形、正方形傾斜 45 度、改變對比值）

- (1) 利用 PowerPoint 進行形狀製作

- (2) 進行觀察，並記錄是否產生鬼影，如果有，則記錄顏色。

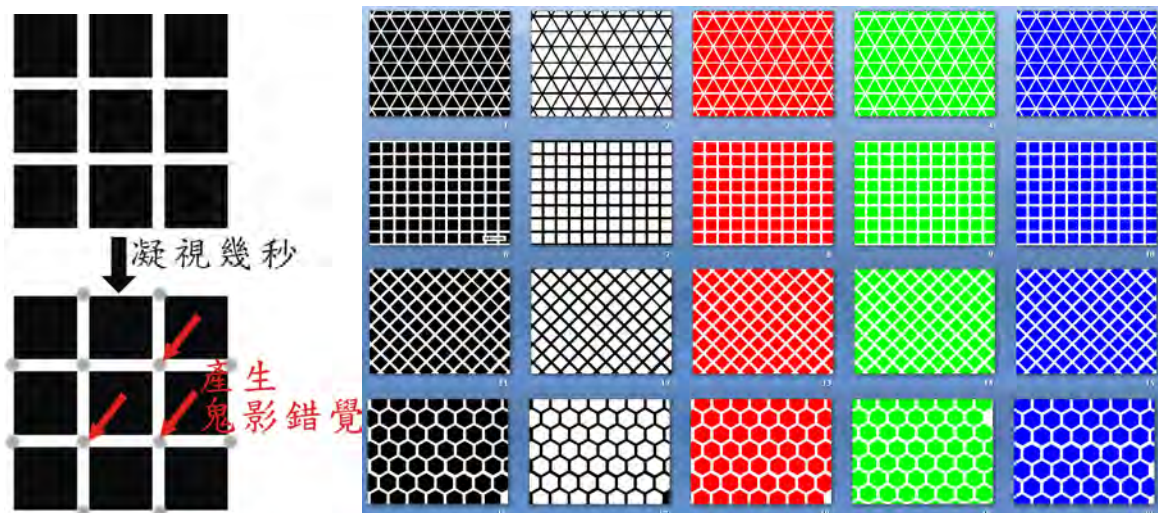


圖 12、左、鬼影實驗說明；右、鬼影測試頁面

3. 盲點

- (1) 在左右各放兩個點，用板子將右眼遮住，將左眼視線注視在黑點上，前後移動到讓眼角餘光看不到黑點（找到盲點）。
- (2) 製作長方形色塊，放在第二頁。
- (3) 切換到第二張後，切換到第三張，問是否在青點處看到不同顏色（確認是否確實找到盲點位置，若有找到盲點，理論上應該會看到一片紅色）。

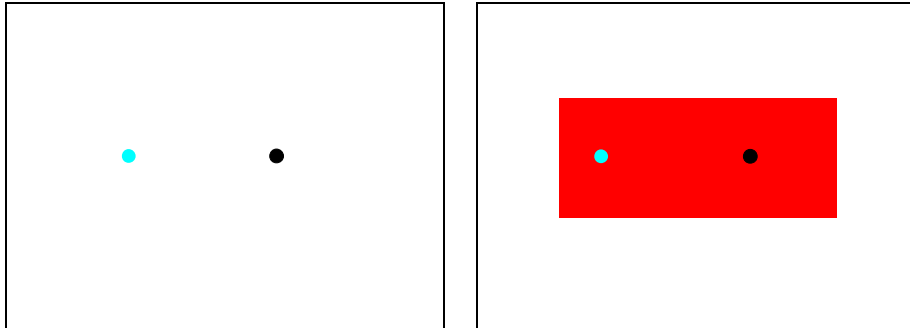


圖 13、盲點:左圖為起始頁面（尋找鬼影），右圖為測試頁面，

- (4) 有色塊：第二頁，將青點處放上綠色方塊，詢問受試者在綠色方塊處是否看到其負片後像，以及顏色為何。

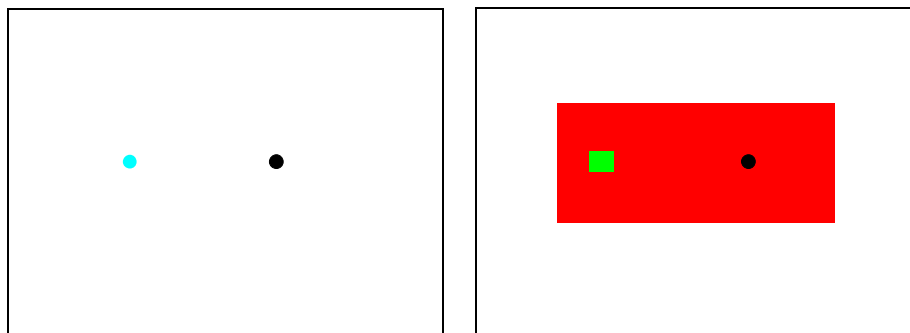


圖 14、盲點(有色塊):左圖為起始頁面，右圖為測試頁面

四、統計方法

- (一) 我們請 30 人進行每項實驗測試並填寫紀錄。
- (二) 統計成表格、圖像，並觀察數據。

1. 加權平均數運算公式:

加權平均值 R' = 將每個選項的 R 值以人數比例(選擇人數/總人數)加權、加總

加權平均值 G' = 將每個選項的 G 值以人數比例(選擇人數/總人數)加權、加總

加權平均值 B' = 將每個選項的 B 值以人數比例(選擇人數/總人數)加權、加總

2. 灰階值運算公式: 因為人類視覺對 RGB 三色的亮度感覺不同，所以以灰階值代表色彩亮度 $W=0.3R+0.59G+0.11B$

- (三) 討論、並做出結論。

伍、研究結果

一、負片後像的顏色探討

(一) 各種顏色（白底）的負片後像

我們假設：負片後像的產生是由於視錐細胞發生感覺疲勞，導致對於光線產生辨識錯誤，因此我們的選項設計中，將 255 減去原圖形的 RGB 值作為第 4 號選項，往左右各推三色，作為其他選項，且觀察時間越久，可能越接近 4 號。

1. 不同顏色、觀察時間的負片後像

白底□（R255 G255 B255）：

紅球●（R255 G0 B0）

	1 號	2 號	3 號	4 號	5 號	6 號	7 號	8 號	加權平均
RGB	R0G255B0	R0G255B85	R0G255B170	R0G255B255	R0G170B255	R0G85B255	R0G0B255	沒看到	
5 秒	1	0	7	14	3	1	0	6	R0G239B222
10 秒	0	2	3	14	7	2	0	4	R0G222B234
30 秒	1	3	5	18	2	0	1	2	R0G241B215

綠球●（R0 G255 B0）

	1 號	2 號	3 號	4 號	5 號	6 號	7 號	8 號	加權平均
RGB	R0G0B255	R85G0B255	R170G0B255	R255G0B255	R255G0B170	R255G0B85	R255G0B0	沒看到	
5 秒	1	1	1	14	2	7	1	5	R236G0B195
10 秒	0	0	1	18	5	5	2	1	R252G0B197
30 秒	1	1	2	19	4	4	0	1	R236G0B222

藍球●（R0 G0 B255）

	1 號	2 號	3 號	4 號	5 號	6 號	7 號	8 號	加權平均
RGB	R255G0B0	R255G85B0	R255G170B0	R255G255B0	R170G255B0	R85G255B0	R0G255B0	沒看到	
5 秒	1	0	1	15	8	3	1	3	R205G243B0
10 秒	0	0	1	15	8	5	2	1	R181G244B0
30 秒	0	0	3	15	5	8	1	0	R183G239B0

紫球●（R170 G0 B255）

	1 號	2 號	3 號	4 號	5 號	6 號	7 號	8 號	加權平均
RGB	R255G170B0	R255G255B0	R170G255B0	R85G255B0	R0G255B0	R0G255B85	R0G255B170	沒看到	
5 秒	0	13	8	6	2	0	0	3	R179G255B0
10 秒	1	12	3	11	4	0	0	1	R154G252B0
30 秒	0	10	6	11	1	2	1	1	R145G255B11

橘球●（R255 G170 B0）

	1 號	2 號	3 號	4 號	5 號	6 號	7 號	8 號	加權平均
RGB	R0G255B170	R0G255B255	R0G170B255	R0G85B255	R0G0B255	R85G0B255	R170G0B255	沒看到	
5 秒	3	5	3	9	2	0	0	10	R0G151B243
10 秒	2	3	4	13	2	2	2	4	R18G109B249
30 秒	2	2	3	12	3	1	8	1	R47G82B250

黃球●（R255 G255 B0）

	1 號	2 號	3 號	4 號	5 號	6 號	7 號	8 號	加權平均
RGB	R0G255B255	R0G170B255	R0G85B255	R0G0B255	R85G0B255	R170G0B255	R255G0B255	沒看到	
5 秒	7	3	2	9	0	4	2	5	R44G91B255
10 秒	5	2	2	8	3	7	5	0	R85G56B255
30 秒	4	2	2	8	4	5	7	0	R93G48B255

表 2、紅、綠、藍、紫、橘、黃球白底研究結果

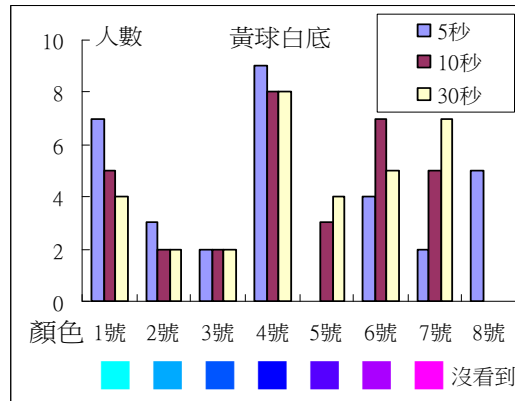
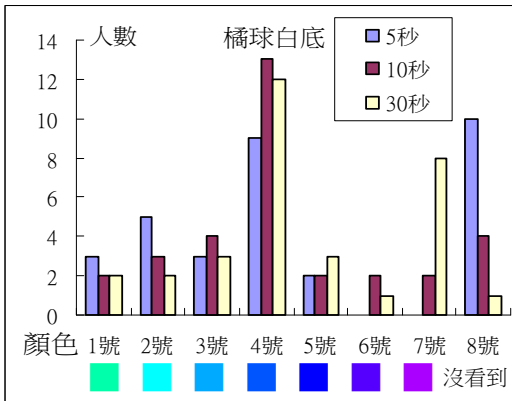
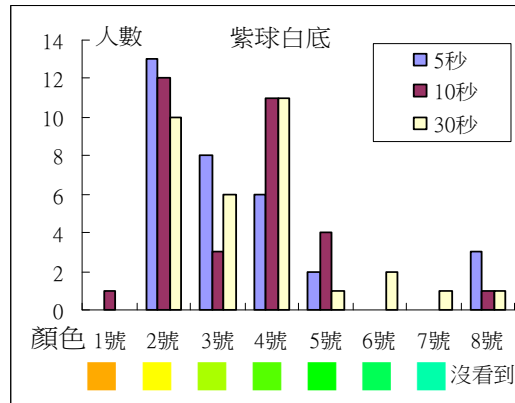
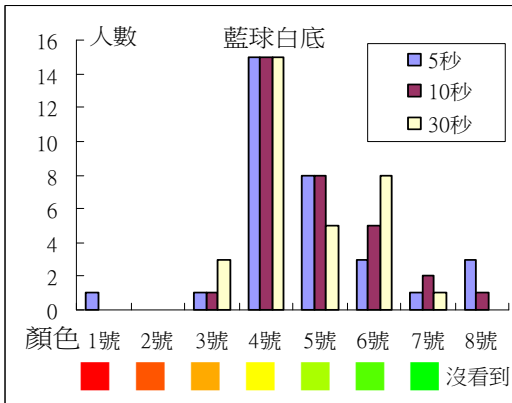
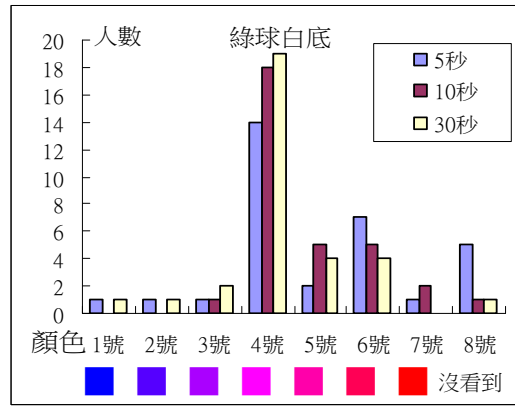
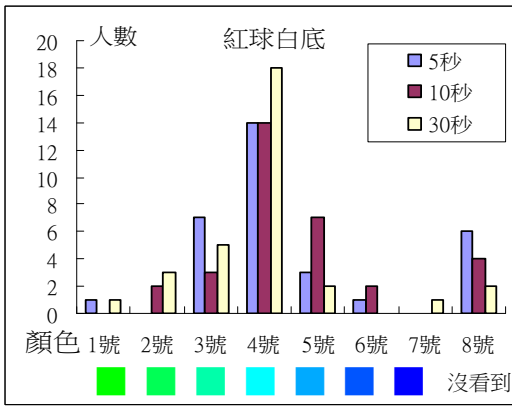


圖 15、紅、綠、藍、紫、橘、黃球白底研究結果

→我們發現，無論觀察 5 秒、10 秒、30 秒，選擇我們計算出來的理論值（4 號）的人都是最多的。且隨著觀察時間增加，選擇理論值（4 號）的人次也變多；加權平均值也大致無誤，證實我們的預測正確。

2. 負片後像的亮度：

我們假設：觀察時間越久，感覺疲勞的視錐細胞越多，造成負片後像的亮度慢慢下降，此外，藉由加權平均的顏色改變，應該能算出感覺疲勞的視錐細胞比例。

紅球●（R255 G0 B0）由實驗發現：

觀察時間 5 秒時加權平均值(R185G255B255) R 值下降 27.45%

觀察時間 10 秒時加權平均值(R156G255B255) R 值下降 38.82%

觀察時間 30 秒時加權平均值(R116G255B255) R 值下降 54.51%

	1 號	2 號	3 號	4 號	5 號	6 號	7 號	加權平均	亮度(灰階值)
RGB	R0G255B255	R51G255B255	R102G255B255	R153G255B255	R204G255B255	R230G255B255	沒看到		
5 秒	0	1	3	9	9	8	2	R185G255B255	234.00
10 秒	0	2	7	13	6	2	2	R156G255B255	225.30
30 秒	2	6	13	5	2	4	0	R116G255B255	213.30

綠球●（R0 G255 B0）由實驗發現：

觀察時間 5 秒時加權平均值(R255G171B255) G 值下降 32.94%

觀察時間 10 秒時加權平均值(R255G140B255) G 值下降 45.10%

觀察時間 30 秒時加權平均值(R255G107B255) G 值下降 58.04%

	1 號	2 號	3 號	4 號	5 號	6 號	7 號	加權平均	亮度(灰階值)
RGB	R255G0B255	R255G51B255	R255G102B255	R255G153B255	R255G204B255	R255G230B255	沒看到		
5 秒	1	2	4	7	11	6	1	R255G171B255	205.44
10 秒	1	3	8	12	6	2	0	R255G140B255	187.15
30 秒	3	6	13	6	2	2	0	R255G107B255	167.68

藍球●（R0 G0 B255）由實驗發現：

觀察時間 5 秒時加權平均值(R255G255B162) B 值下降 36.47%

觀察時間 10 秒時加權平均值(R255G255B112) B 值下降 56.08%

觀察時間 30 秒時加權平均值(R255G255B99) B 值下降 61.18%

	1 號	2 號	3 號	4 號	5 號	6 號	7 號	加權平均	亮度(灰階值)
RGB	R255G255B0	R255G255B51	R255G255B102	R255G255B153	R255G255B204	R255G255B230	沒看到		
5 秒	1	1	9	7	6	5	3	R255G255B162	244.77
10 秒	2	5	14	7	4	0	0	R255G255B112	239.27
30 秒	4	9	10	3	6	0	0	R255G255B99	237.84

表 3、紅、綠、藍球白底(深淺)研究結果

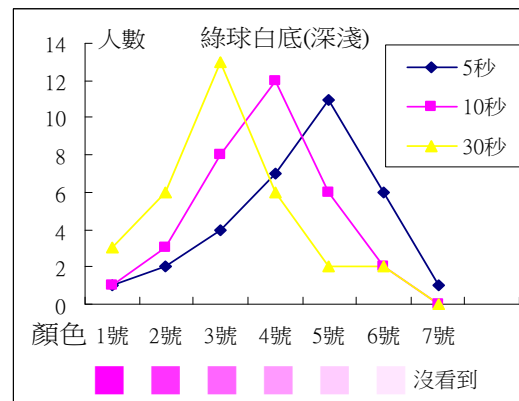
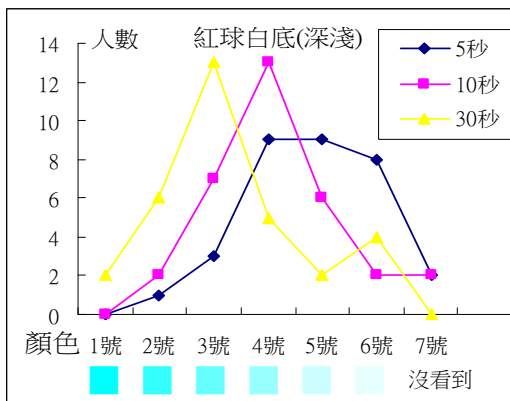


圖 16、紅、綠、藍球白底(深淺)研究結果(續下頁)

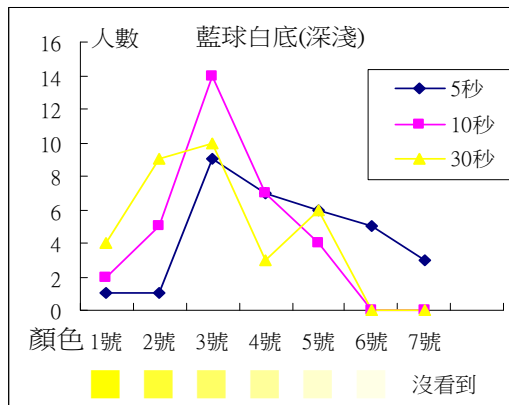


圖 16、紅、綠、藍球白底(深淺)研究結果(承上頁)

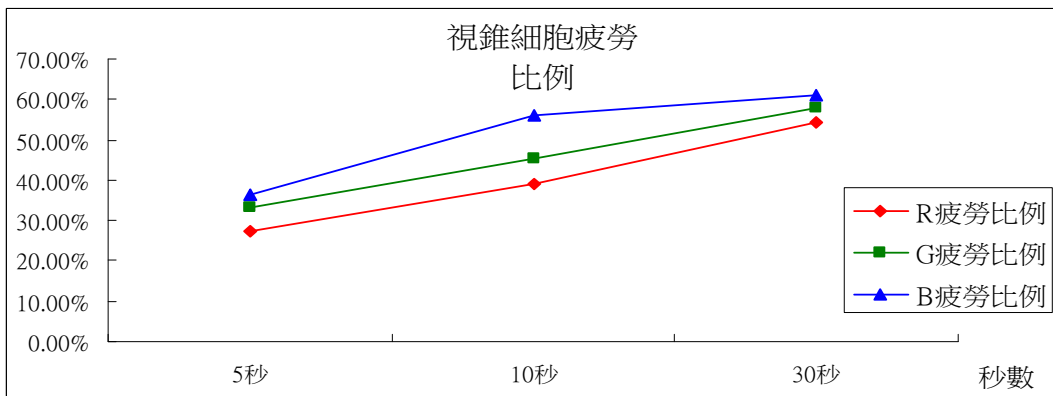


圖 17、視錐細胞疲勞比例圖

→我們發現，觀察時間越久，RGB 疲勞比例會越高，而同樣時間，疲勞比例最高是 B (5 秒 36.47%→10 秒 56.08%→30 秒 61.18%)，其次是 G (5 秒 33.33%→10 秒 45.10%→30 秒 58.04%)，最後是 R (5 秒 27.45%→10 秒 38.32%→30 秒 54.51%)。

因此我們提出以下公式

假設球的顏色是 紅 = R；綠 = G；藍 = B

在白底時，

看 5 秒的顏色 R' G' B'

$$R' = 255 - (R \times 0.2745) \quad G' = 255 - (G \times 0.3333) \quad B' = 255 - (B \times 0.3647)$$

看 10 秒的顏色 R' G' B'

$$R' = 255 - (R \times 0.3832) \quad G' = 255 - (G \times 0.451) \quad B' = 255 - (B \times 0.5608)$$

看 30 秒的顏色 R' G' B'

$$R' = 255 - (R \times 0.5451) \quad G' = 255 - (G \times 0.5804) \quad B' = 255 - (B \times 0.6118)$$

根據上述實驗結果，我們再假設：紫球白底看到的情形可能是

5 秒：R208G255B162；10 秒：R190G255B112；30 秒：R162G255B99

紫球 (R170 G0 B255) 由實驗發現：

觀察時間 5 秒時加權平均值(R202G255B175) 與預估值(R208G255B162)接近

觀察時間 10 秒時加權平均值(R158G255B118) 與預估值(R190G255B112)接近

觀察時間 30 秒時加權平均值(R145G255B94) 與預估值(R162G255B99)接近

	1 號	2 號	3 號	4 號	5 號	6 號	7 號	加權平均	亮度(灰階值)
RGB	R85G255B0	R119G255B51	R153G255B102	R187G255B153	R221G255B204	R238G255B230	沒看到		
5 秒	0	4	5	5	7	4	7	R202G255B175	230.30
10 秒	1	7	9	5	6	0	2	R158G255B118	210.83
30 秒	1	16	6	3	2	2	1	R145G255B94	204.29

表 4、紫、橘、黃球白底(深淺)研究結果(續下頁)

我們再假設：橘球白底看到的情形可能是

5 秒：R185G198B255；10 秒：R157G178B255；30 秒：R115G156B255

橘球 ● (R255 G170 B0) 由實驗發現：

觀察時間 5 秒時加權平均值(R191G215B255) 與預估值(R185G198B255)接近

觀察時間 10 秒時加權平均值(R139G175B255) 與預估值(R157G178B255)接近

觀察時間 30 秒時加權平均值(R99G148B255) 與預估值(R115G156B255)接近

	1 號	2 號	3 號	4 號	5 號	6 號	7 號	加權平均	亮度(灰階值)
RGB	R0G85B255	R51G119B255	R102G153B255	R153G187B255	R204G221B255	R230G238B255	沒看到		
5 秒	1	1	4	2	7	11	6	R191G215B255	212.20
10 秒	1	3	9	7	8	3	0	R139G175B255	173.00
30 秒	4	9	9	2	5	2	0	R99G148B255	145.07

我們再假設：黃球白底看到的情形可能是

5 秒：R185G185B255；10 秒：R157G157B255；30 秒：R115G115B255

黃球 ● (R255 G255 B0) 由實驗發現：

觀察時間 5 秒時加權平均值(R192G192B255) 與預估值(R185G185B255)接近

觀察時間 10 秒時加權平均值(R154G154B255) 與預估值(R157G157B255)接近

觀察時間 30 秒時加權平均值(R127G127B255) 與預估值(R115G115B255)接近

	1 號	2 號	3 號	4 號	5 號	6 號	7 號	加權平均	亮度(灰階值)
RGB	R0G0B255	R51G51B255	R102G102B255	R153G153B255	R204G204B255	R230G230B255	沒看到		
5 秒	1	1	2	7	7	7	7	R192G192B255	198.93
10 秒	2	1	3	16	8	1	1	R154G154B255	165.11
30 秒	4	1	9	12	5	1	0	R127G127B255	141.08

表 4、紫、橘、黃球白底(深淺)研究結果(承上頁)

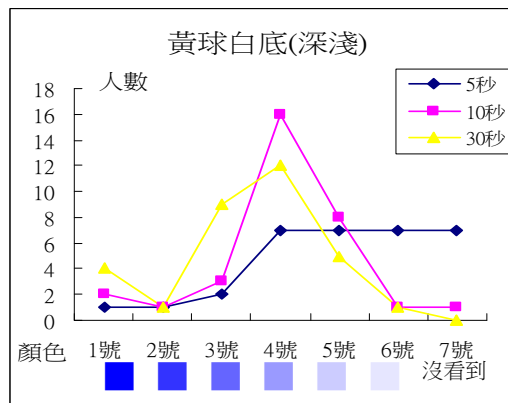
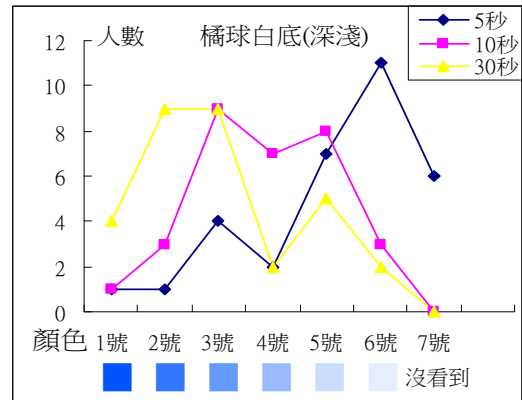
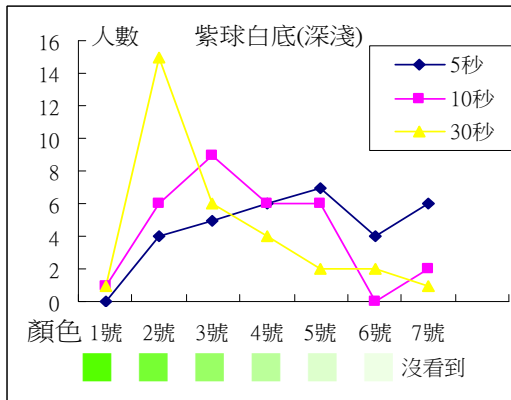


圖 18、紫、橘、黃球白底(深淺)研究結果

→我們發現，觀察時間越久，視錐細胞疲勞的比例會增加，改成紫球、橘球、黃球，結果也符合我們的假說。

(二) 背景顏色對負片後像效果的影響

我們假設：黑色底時，假如完全沒有光，理論上負片後像看到的應該是全黑，除非螢幕仍有些許的光。

1. 黑底■(R0 G0 B0):

紅球●(R255 G0 B0)

	1 號	2 號	3 號	4 號	5 號	6 號	7 號	8 號	加權平均
RGB	R0G85B0	R0G85B28	R0G85B57	R0G85B85	R0G57B85	R0G28B85	R0G0B85	沒看到	
5 秒	2	0	5	6	4	5	1	9	R0G64B72
10 秒	1	1	1	11	3	10	3	2	R0G55B81
30 秒	1	1	4	11	3	3	6	3	R0G56B76

綠球●(R0 G255 B0)

	1 號	2 號	3 號	4 號	5 號	6 號	7 號	8 號	加權平均
RGB	R0G0B85	R28G0B85	R57G0B85	R85G0B85	R85G0B57	R85G0B28	R85G0B0	沒看到	
5 秒	2	2	15	6	1	2	0	4	R60G0B80
10 秒	0	1	14	6	6	2	1	2	R70G0B73
30 秒	2	3	13	4	7	3	0	0	R63G0B74

藍球●(R0 G0 B255)

	1 號	2 號	3 號	4 號	5 號	6 號	7 號	8 號	加權平均
RGB	R85G0B0	R85G28B0	R87G57B0	R85G85B0	R57G85B0	R28G85B0	R0G85B0	沒看到	
5 秒	3	4	4	7	2	4	0	8	R73G60B0
10 秒	2	13	9	5	1	2	0	0	R81G49B0
30 秒	2	11	6	8	4	1	0	0	R80G55B0

紫球●(R170 G0 B255)

	1 號	2 號	3 號	4 號	5 號	6 號	7 號	8 號	加權平均
RGB	R85G57B0	R85G85B0	R57G85B0	R28G85B0	R0G85B0	R0G85B28	R0G85B57	沒看到	
5 秒	1	1	6	8	1	3	2	10	R33G84B9
10 秒	1	5	4	6	5	2	3	6	R35G84B9
30 秒	0	1	4	8	8	5	5	1	R17G85B14

橘球●(R255 G170 B0)

	1 號	2 號	3 號	4 號	5 號	6 號	7 號	8 號	加權平均
RGB	R0G85B57	R0G85B85	R0G57B85	R0G28B85	R0G0B85	R28G0B85	R57G0B85	沒看到	
5 秒	3	1	10	3	5	3	1	6	R5G38B82
10 秒	2	5	4	7	8	0	4	2	R8G34B83
30 秒	1	2	5	7	8	3	6	0	R13G23B84

黃球●(R255 G255 B0)

	1 號	2 號	3 號	4 號	5 號	6 號	7 號	8 號	加權平均
RGB	R0G85B85	R0G57B85	R0G28B85	R0G0B85	R28G0B85	R57G0B85	R85G0B85	沒看到	
5 秒	0	1	1	5	15	5	1	4	R26G3B85
10 秒	2	0	0	10	7	10	2	1	R30G5B85
30 秒	0	3	2	7	6	12	2	0	R32G7B85

表 7、紅、綠、藍、紫、橘、黃球黑底研究結果

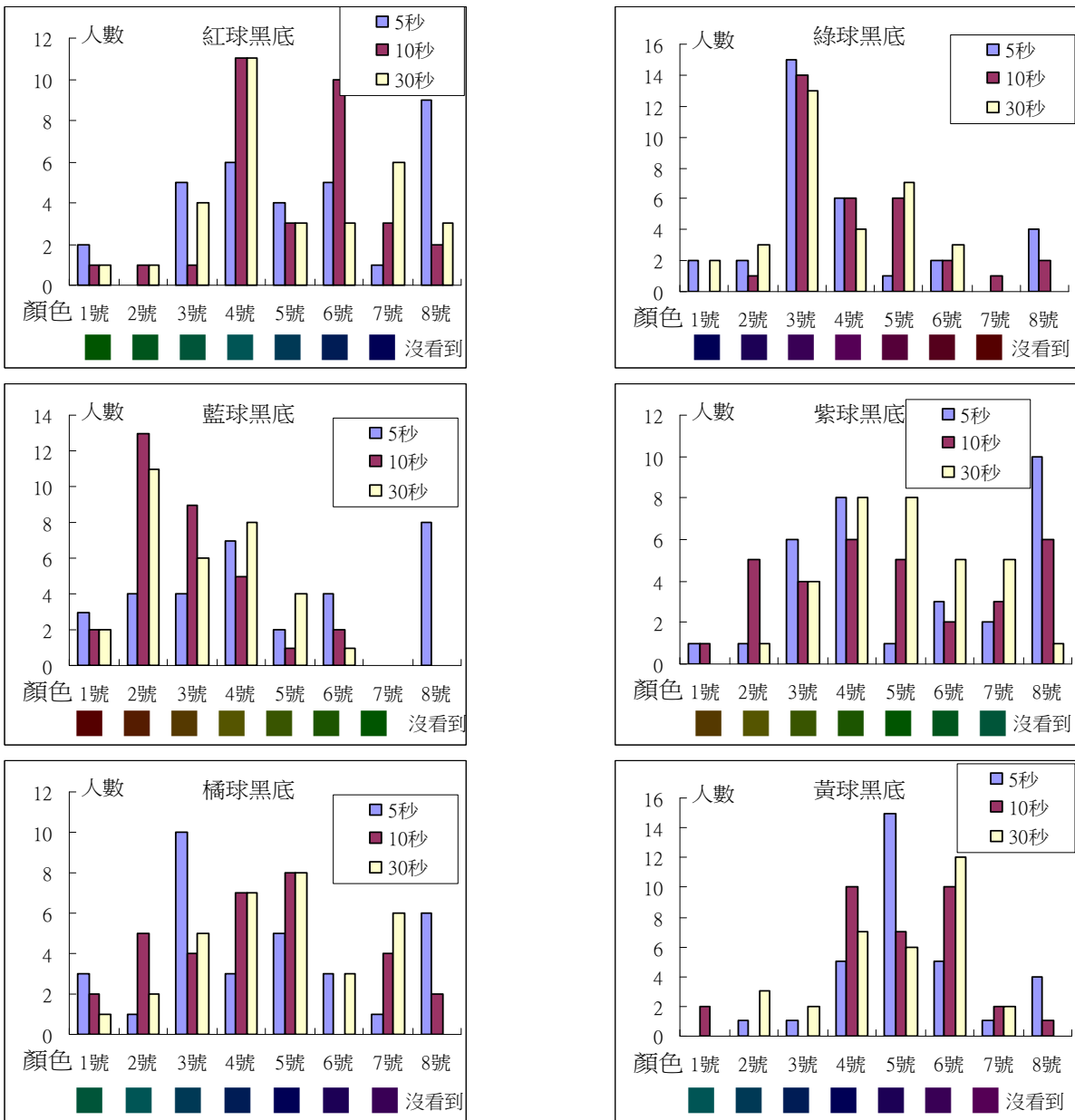


圖 19、紅、綠、藍、紫、橘、黃球黑底研究結果

→我們發現，螢幕是黑底的時候，仍有負片後像，可能是螢幕仍透出淡淡的光，或瞳孔放大以接收更多微弱的光，但少許的光使受試者不易判斷顏色，所以實驗結果比較分歧。

2. 背景顏色對負片後像的影響：

我們假設：理論上紅球綠底或藍底，不該有負片後像（因為只有對紅光感覺疲勞）；除非我們的視覺在觀察綠底或藍底時，仍有接收到紅光。

紅球 ● (R255 G0 B0)

	30 秒加權平均
綠底 (R0G255B0)	R74 G255 B74
藍底 (R0G0B255)	R65 G65 B255

綠球 ● (R0 G255 B0)

	30 秒加權平均
紅底 (R255G0B0)	R255G59B59
藍底 (R0G0B255)	R68G68B255

藍球 ● (R0 G0 B255)

	30 秒加權平均
紅底 (R255G0B0)	R255 G134 B73
綠底 (R0G255B0)	R144G255 B88

表 8、紅球綠底、藍底；綠球紅底、綠底；藍球紅底、綠底研究結果

→我們發現，紅球綠、藍底及綠球紅、藍底的負片後像都和底色接近，但比底色亮；而藍球紅、綠底的負片後像，卻跟底色略有不同，比較亮，我們推測，可能是因為藍色在我們眼中看起來比較深，而使負片後像的產生較明顯。

紫球●(R170 G0 B255)紅底■(R255G0B0)

由實驗發現 觀察時間 30 秒加權平均值(R255G49B55)

	1 號	2 號	3 號	4 號	5 號	6 號	7 號	8 號	加權平均
RGB	R255G51B255	R255G51B187	R255G51B119	R255G51B51	R255G119B51	R255G187B51	R255G255B51	沒看到	
30 秒	1	0	2	23	2	0	0	4	R255G49B55

紫球●(R170 G0 B255)綠底■(R0G255B0)

由實驗發現觀察時間 30 秒加權平均值(R74G255B49)

	1 號	2 號	3 號	4 號	5 號	6 號	7 號	8 號	加權平均
RGB	R255G187B51	R255G255B51	R187G255B51	R119G255B51	R51G255B51	R51G255B119	R51G255B187	沒看到	
30 秒	0	0	1	12	13	2	0	4	R74G255B49

紫球●(R170 G0 B255)藍底■(R0G0B255)

由實驗發現觀察時間 30 秒加權平均值(R46G78B253)

	1 號	2 號	3 號	4 號	5 號	6 號	7 號	8 號	加權平均
RGB	R51G255B187	R51G255B255	R51G187B255	R51G119B255	R51G51B255	R119G51B255	R187G51B255	沒看到	
30 秒	1	1	1	9	12	2	0	6	R46G78B253

表 9、紫球紅底、綠底、藍底研究結果

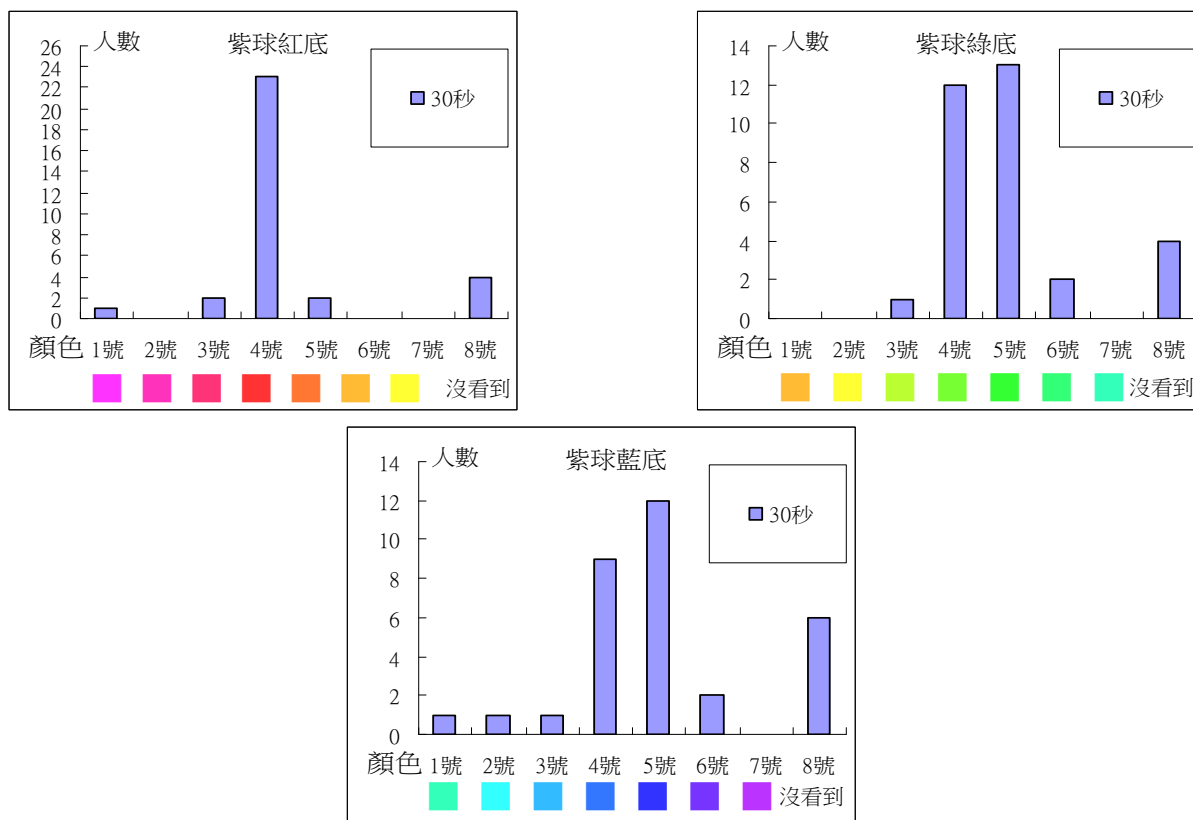




圖 20、紫球紅底、綠底、藍底研究結果

→我們發現，就算底色是紅底，但眼睛還是會接收到少許的綠色、藍色光線；負片後像的顏色會隨著底色顏色的改變而有所改變，因負片後像的顏色會和底色疊合；而在綠底上的亮度(162.59)會大於紅底(122.33)，接著是藍底(62.22)。

3-1.黑球●(R0 G0 B0)白底□(R255 G255 B255)的負片後像

我們假設：黑球白底應沒有負片後像，因為黑色不會使視錐細胞感覺疲勞。

	A	B	C	D
圖例	 看到白色的球，旁邊有淡淡的陰影	 看到白色的球，旁邊有大範圍陰影	沒看到	其他
30 秒	23	6	3	0

3-2.白球○(R255 G255 B255)黑底■(R0 G0 B0)的負片後像

我們假設：白球黑底應沒有負片後像，因為底色是黑的，沒有光。


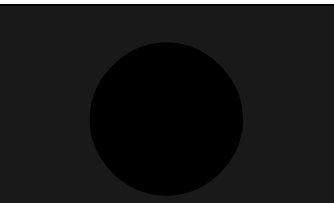
	A	B	C	D
圖例	 看到黑色的球，旁邊有陰影	 看到黑色的球	沒看到	其他
30 秒	19	9	3	1

表 10、黑球白底、白球黑底研究結果

→我們發現，黑球白底的負片後像，在大多數人看到的是白色的球旁邊有淡淡的陰影，我們覺得可能是相對視覺所造成的；白球黑底的負片後像大多數人看到黑色（更深）的球旁邊有陰影，我們覺得可能是螢幕在黑色底色時仍透出淡淡的光線導致的。

(三) 探討單眼觀察對負片後像效果的影響

我們假設：單眼觀察時，感覺疲勞的視錐細胞只剩其中一眼，結果可能不同。

右眼紅球●(R255 G0 B0)白底□(R255 G255 B255)的負片後像由實驗發現：

觀察時間 5 秒時加權平均值(R180G255B255) 亮度 232.5 R 值下降 29.41%

觀察時間 10 秒時加權平均值(R152G255B255) 亮度 224.1 R 值下降 40.39%

觀察時間 30 秒時加權平均值(R81G255B255) 亮度 202.8 R 值下降 68.24%

	1 號	2 號	3 號	4 號	5 號	6 號	7 號	加權平均	亮度(灰階值)
RGB	R0G255B255	R51G255B255	R102G255B255	R153G255B255	R204G255B255	R230G255B255	沒看到		
5 秒	1	1	5	6	5	12	2	R180G255B255	232.50
10 秒	1	2	8	9	8	3	1	R152G255B255	224.10
30 秒	4	12	11	4	0	0	1	R81G255B255	202.80

左眼紅球●(R255 G0 B0)白底□(R255 G255 B255)的負片後像由實驗發現：

觀察時間 5 秒時加權平均值(R179G255B255) 亮度 232.2 R 值下降 29.80%

觀察時間 10 秒時加權平均值(R157G255B255) 亮度 225.6 R 值下降 38.43%

觀察時間 30 秒時加權平均值(R92G255B255) 亮度 206.10 R 值下降 63.92%

	1 號	2 號	3 號	4 號	5 號	6 號	7 號	加權平均	亮度(灰階值)
RGB	R0G255B255	R51G255B255	R102G255B255	R153G255B255	R204G255B255	R230G255B255	沒看到		
5 秒	0	2	3	9	8	9	1	R179G255B255	232.20
10 秒	0	2	6	14	5	5	0	R157G255B255	225.60
30 秒	1	16	8	3	2	2	0	R92G255B255	206.10

表 11、紅、綠、藍白底(用右眼觀察)、(用左眼觀察)深淺研究結果（續下頁）

右眼綠球●(R0G255B0)白底□(R255 G255 B255)的負片後像由實驗發現：
 觀察時間 5 秒時加權平均值(R255G132B255) 亮度 180.07 G 值下降 48.24%
 觀察時間 10 秒時加權平均值(R244G116B255) 亮度 172.99 G 值下降 54.51%
 觀察時間 30 秒時加權平均值(R255G94B255) 亮度 160.01 G 值下降 63.14%

	1 號	2 號	3 號	4 號	5 號	6 號	7 號	加權平均	亮度(灰階值)
RGB	R255G0B255	R255G51B255	R255G102B255	R255G153B255	R255G204B255	R255G230B255	沒看到		
5 秒	0	5	8	14	2	1	1	R255G132B255	182.70
10 秒	1	5	16	4	6	0	0	R255G116B255	173.19
30 秒	5	9	8	7	2	0	1	R255G94B255	160.03

左眼綠球●(R0G255B0)白底□(R255 G255 B255)的負片後像由實驗發現：
 觀察時間 5 秒時加權平均值(R255G126B255) 亮度 178.89 G 值下降 50.63%
 觀察時間 10 秒時加權平均值(R255G112B255) 亮度 170.63 G 值下降 55.93%
 觀察時間 30 秒時加權平均值(R255G98B255) 亮度 162.37 G 值下降 61.56%

	1 號	2 號	3 號	4 號	5 號	6 號	7 號	加權平均	亮度(灰階值)
RGB	R255G0B255	R255G51B255	R255G102B255	R255G153B255	R255G204B255	R255G230B255	沒看到		
5 秒	2	3	11	10	6	0	0	R255G126B255	178.89
10 秒	2	5	13	9	2	1	0	R255G112B255	170.63
30 秒	3	13	4	8	3	1	0	R255G98B255	162.37

右眼藍球●(R0 G0 B255)白底□(R255 G255 B255)的負片後像由實驗發現：
 觀察時間 5 秒時加權平均值(R255G255B113) 亮度 239.38 B 值下降 55.63%
 觀察時間 10 秒時加權平均值(R255G255B94) 亮度 237.29 B 值下降 63.13%
 觀察時間 30 秒時加權平均值(R255G255B80) 亮度 235.75 B 值下降 68.75%

	1 號	2 號	3 號	4 號	5 號	6 號	7 號	加權平均	亮度(灰階值)
RGB	R255G255B0	R255G255B51	R255G255B102	R255G255B153	R255G255B204	R255G255B230	沒看到		
5 秒	1	2	18	11	0	0	0	R255G255B113	239.38
10 秒	2	7	17	6	0	0	0	R255G255B94	237.29
30 秒	5	11	10	5	1	0	0	R255G255B80	235.75

左眼藍球●(R0G0 B255)白底□(R255 G255 B255)的負片後像由實驗發現：
 觀察時間 5 秒時加權平均值(R255G255B120) 亮度 240.16 R 值下降 52.90%
 觀察時間 10 秒時加權平均值(R255G255B117) 亮度 239.80 R 值下降 54.19%
 觀察時間 30 秒時加權平均值(R255G255B94) 亮度 237.29 R 值下降 63.13%

	1 號	2 號	3 號	4 號	5 號	6 號	7 號	加權平均	亮度(灰階值)
RGB	R255G255B0	R255G255B51	R255G255B102	R255G255B153	R255G255B204	R255G255B230	沒看到		
5 秒	1	3	13	12	2	0	1	R255G255B120	240.16
10 秒	1	2	16	11	1	0	1	R255G255B117	239.80
30 秒	2	9	15	4	2	0	0	R255G255B94	237.29

表 11、紅、綠、藍白底(用右眼觀察)、(用左眼觀察)深淺研究結果(承上頁)

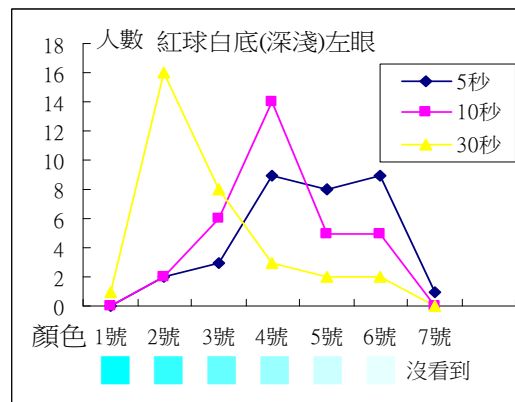
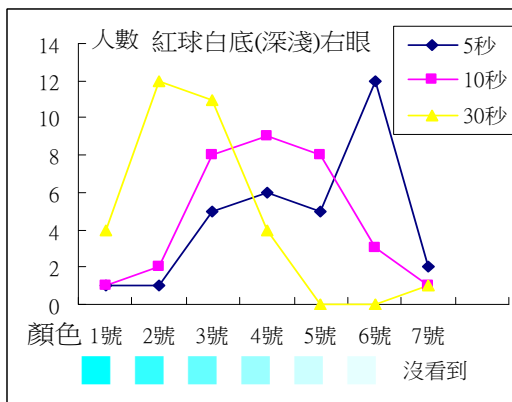


圖 21、紅、綠、藍白底單眼觀察研究結果(續下頁)

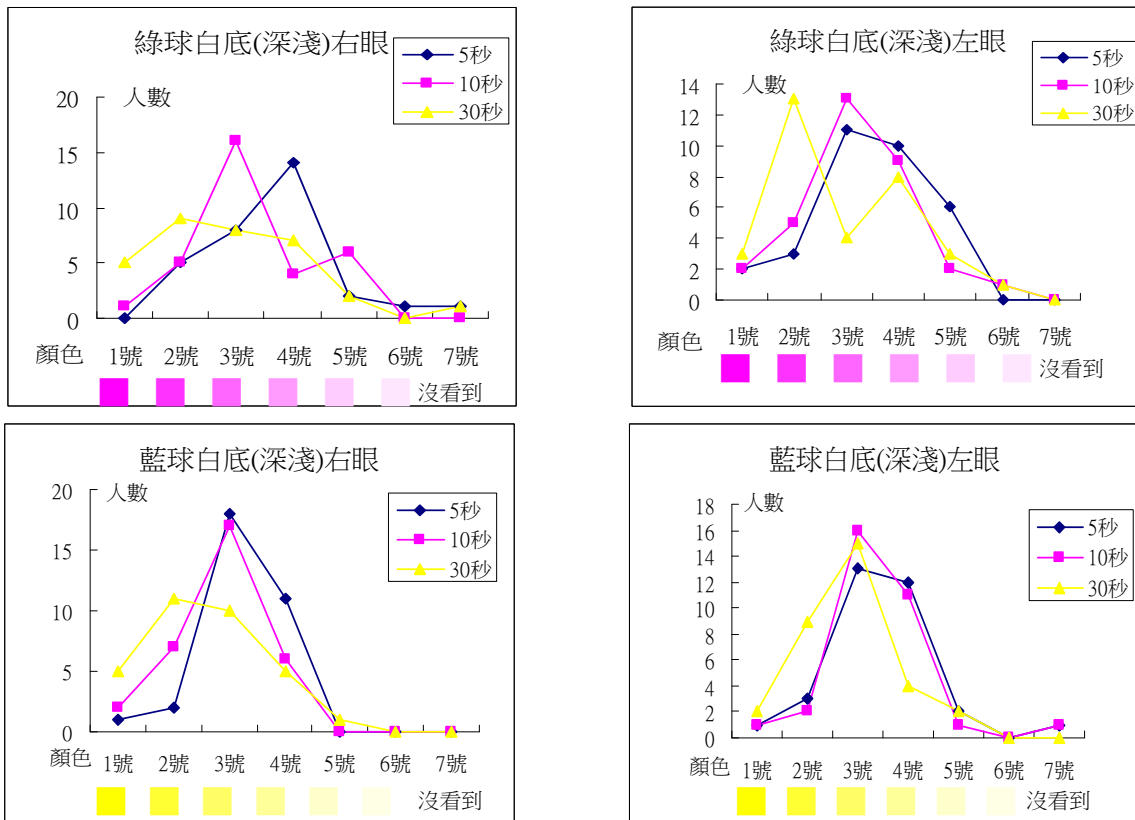


圖 22、紅、綠、藍白底單眼觀察研究結果(承上頁)

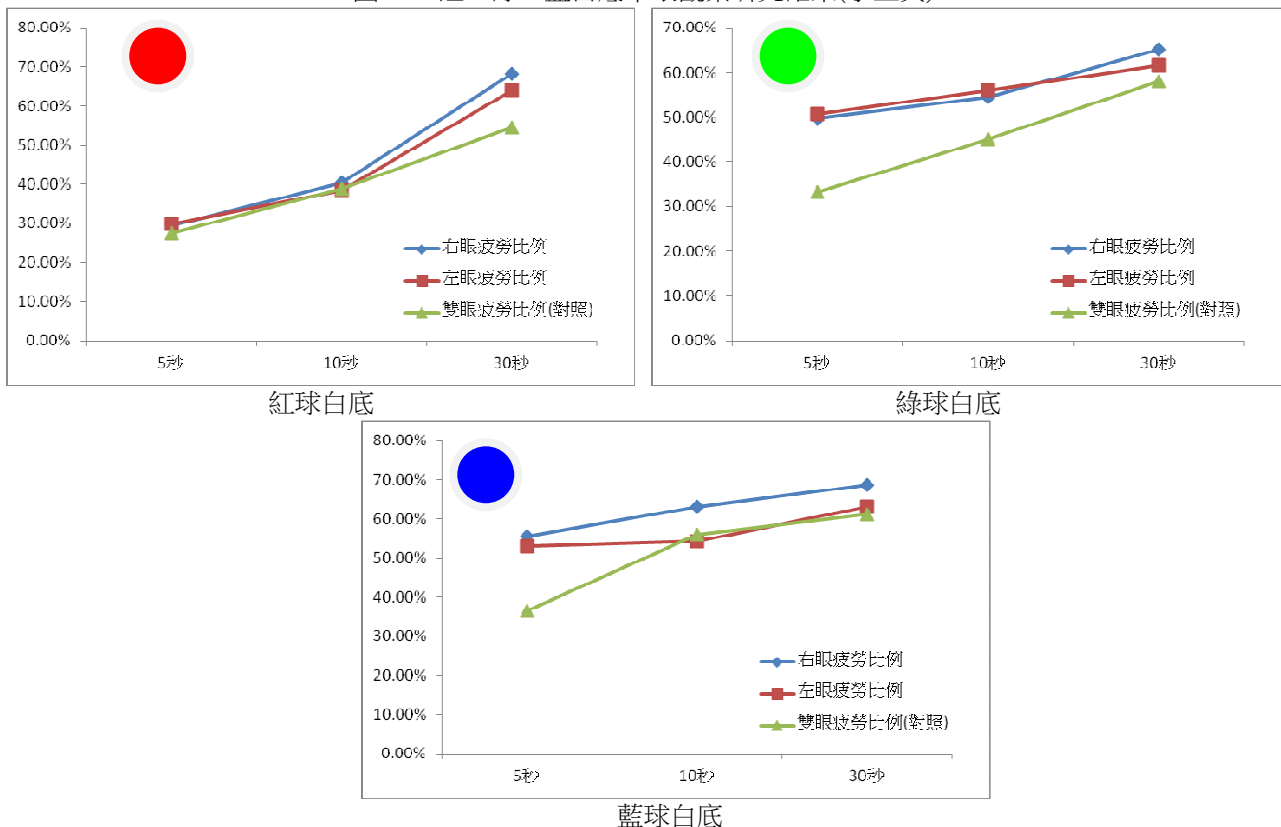


圖 23、紅、綠、藍白底單眼觀察視錐細胞疲勞比例

→我們發現，雙眼觀察的亮度值比單眼觀察的亮度值高，且雙眼觀察時疲勞比例比單眼觀察時來得低，用左眼觀察的亮度值、疲勞比例和用右眼觀察的亮度值、疲勞比例並無明顯的差異。

二、負片後像與視錯覺

(一) 旋轉球

我們假設：旋轉球也是一種負片後像導致的視錯覺，所以轉速、有無引導可能會影響結果。

旋轉球紅●(R255 G0 B0) 白底□(R255 G255 B255)

	1號	2號	3號	4號	5號	6號	7號	8號	加權平均
RGB	R51G255 B51	R51G255 B119	R51G255 B187	R51G255 B255	R51G187 B255	R51G119 B255	R51G51B 255	沒看到	
每圖0.1秒	0	0	1	25	4	0	0	2	R51G246B253
每圖0.1秒 加十字	0	0	1	26	3	0	0	2	R51G248B253
每圖0.5秒	0	0	1	24	2	1	0	4	R51G245B253

旋轉球綠●(R0 G255 B0) 白底□(R255 G255 B255)

	1號	2號	3號	4號	5號	6號	7號	8號	加權平均
RGB	R51G51B 255	R119G51 B255	R187G51 B255	R255G51 B255	R255G51 B187	R255G51 B119	R255G51 B51	沒看到	
每圖0.1秒	0	1	1	20	5	1	0	4	R243G51B229
每圖0.1秒 加十字	0	0	0	26	4	1	0	1	R255G51B242
每圖0.5秒	0	0	1	25	3	1	0	2	R253G51B244

旋轉球藍●(R0 G0 B255) 白底□(R255 G255 B255)

	1號	2號	3號	4號	5號	6號	7號	8號	加權平均
RGB	R102G25 5B102	R153G255 B102	R204G255 B102	R255G255 B102	R255G204 B102	R255G153 B102	R255G102 B102	沒看到	
每圖0.1秒	0	0	1	26	3	0	0	2	R237G234B96
每圖0.1秒 加十字	0	0	1	29	2	0	0	0	R253G252B102
每圖0.5秒	0	0	1	26	2	0	0	3	R230G222B92

旋轉球紫●(R170G0 B255) 白底□(R255 G255 B255)

	1號	2號	3號	4號	5號	6號	7號	8號	加權平均
RGB	R255G18 7B153	R255G221 B153	R255G255 B153	R221G255 B153	R187G255 B153	R153G255 B153	R153G255 B187	沒看到	
每圖0.1秒	0	1	12	13	2	1	1	2	R220G245B149
每圖0.1秒 加十字	0	1	10	17	2	0	0	2	R223G245B148
每圖0.5秒	0	1	10	15	1	0	2	3	R209G245B150

旋轉球橘●(R255 G170 B0) 白底□(R255 G255 B255)

	1號	2號	3號	4號	5號	6號	7號	8號	加權平均
RGB	R153G25 5B187	R153G255 B221	R153G255 B255	R153G221 B255	R153G187 B255	R153G153 B255	R187G153 B255	沒看到	
每圖0.1秒	2	2	11	14	0	0	0	3	R139G216B225
每圖0.1秒 加十字	0	0	11	15	2	0	0	4	R134G217B223
每圖0.5秒	1	2	6	18	1	1	0	3	R139G199B219

旋轉球黃●(R255 G255 B0) 白底□(R255 G255 B255)

	1號	2號	3號	4號	5號	6號	7號	8號	加權平均
RGB	R204G25 5B255	R204G238 B255	R204G221 B255	R204G204 B255	R221G204 B255	R238G204 B255	R255G204 B255	沒看到	
每圖0.1秒	5	4	1	16	3	0	1	2	R207G218B255
每圖0.1秒 加十字	4	4	1	18	2	0	1	2	R207G216B255
每圖0.5秒	4	4	4	15	2	0	1	2	R207G218B255

表 12、各種顏色旋轉球在白底上的研究結果(填灰色表示對照組)

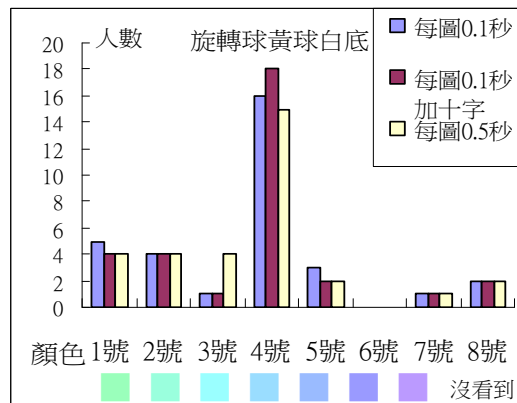
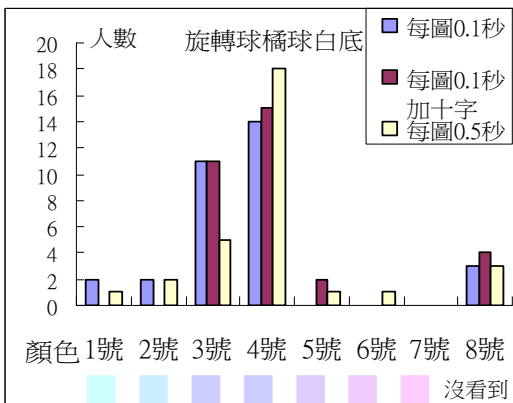
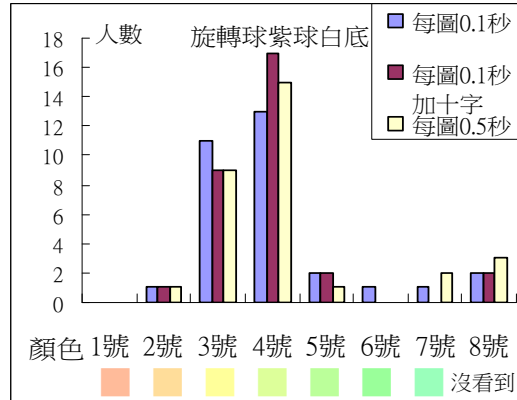
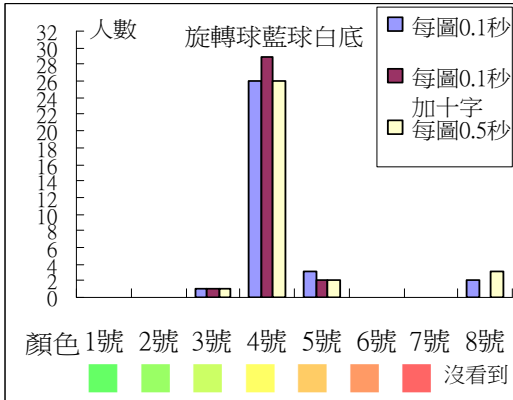
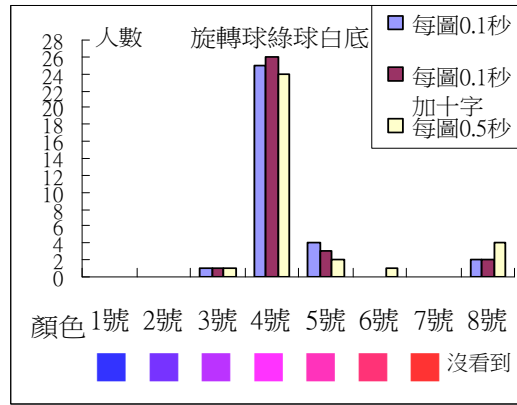
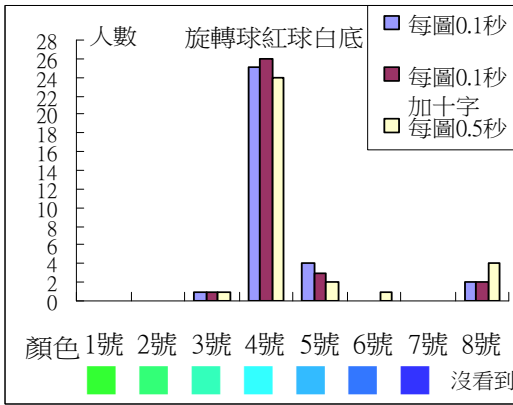


圖 24、各種顏色旋轉球在白底上的研究結果

→我們發現，在轉速 0.1 秒加十字時，大致上看到理論值的人數是最多的，其次是轉速 0.5 秒，最後則是轉速 0.1 秒。

旋轉球黑●(R0 G0 B0) 白底□(R255G255B255)

我們假設：旋轉黑球白底應沒有負片後像，因為黑色不會使視錐細胞感覺疲勞。

	A 有負片後像，看到的是黑色	B 有負片後像，看到的顏色自行選擇	C 有負片後像，看到的是
每圖 0.1 秒	4	1	27
加十字	5	1	26
每圖 0.5 秒	6	2	24

表 13、旋轉黑球白底研究結果

旋轉白○(R255 G255 B255)黑底■(R0 G0 B0)


我們假設：旋轉白球黑底應沒有負片後像，因為底色是黑的，沒有光。

	A 有負片後像，看到 的是白色	B 有負片後像，看到 的顏色自行選擇	C 有負片後像，看到的是 
每圖 0.1 秒	4	4	24
每圖 0.1 秒加十字	4	1	27
每圖 0.5 秒	9	2	21

表 14、旋轉白球黑底研究結果

我們假設：黑球應沒有負片後像，但底色會射出光線，所以負片後像顏色會接近底色。

黑球●(R0G0B0)紅底■(R255G0B0)

	1 號	2 號	3 號	4 號	5 號	6 號	7 號	8 號	9 號	加權平均
RGB	R255G51B2 55	R255G51B1 87	R255G51B1 19	R255G51B5 1	R255G119B 51	R255G187B 51	R255G255B 51		沒看到	
每圖 0.1 秒 加十字	0	0	1	26	0	0	0	5	0	R255G58B5 3


黑球●(R0G0B0)綠底■(R0G255B0)

	1 號	2 號	3 號	4 號	5 號	6 號	7 號	8 號	9 號	加權平均
RGB	R255G255B 51	R187G255B 51	R119G255B 51	R51G255B5 1	R51G255B1 19	R51G255B1 87	R51G255B2 55		沒看到	
每圖 0.1 秒 加十字	0	1	2	24	0	0	0	3	1	R53G255B5 0

黑球●(R0G0B0)藍底■(R0G0B255)

	1 號	2 號	3 號	4 號	5 號	6 號	7 號	8 號	9 號	加權平均
RGB	R102G255B 255	R102G204B 255	R102G153B 255	R102G102B 255	R153G102B 255	R204G102B 255	R255G102B 255		沒看到	
每圖 0.1 秒 加十字	1	5	2	18	4	0	0	2	0	R107G104B 255

黑球●(R0G0B0)紫底■(R170G0B255)

	1 號	2 號	3 號	4 號	5 號	6 號	7 號	8 號	9 號	加權平均
RGB	R102G153B 255	R102G102B 255	R153G102B 255	R204G102B 255	R255G102B 255	R255G102B 204	R255G102B 153		沒看到	
每圖 0.1 秒 加十字	2	0	2	21	0	1	2	1	1	R207G102B 255

黑球●(R0G0B0)橘底■(R255G170B0)

	1 號	2 號	3 號	4 號	5 號	6 號	7 號	8 號	9 號	加權平均
RGB	R255G51B1 19	R255G51B5 1	R255G119B 51	R255G187B 51	R255G255B 51	R187G255B 51	R119G255B 51		沒看到	
每圖 0.1 秒 加十字	0	0	0	21	6	0	0	4	0	R255G192B 51

黑球●(R0G0B0)黃底■(R255G255B0)

	1 號	2 號	3 號	4 號	5 號	6 號	7 號	8 號	9 號	加權平均
RGB	R255G102B 102	R255G153B 102	R255G204B 102	R255G255B 102	R204G255B 102	R153G255B 102	R102G255B 102		沒看到	
每圖 0.1 秒 加十字	0	0	0	24	0	2	2	3	1	R237G255B 102

表 15、旋轉球黑紅底、綠底、藍底、紫底、橘底、黃底研究結果

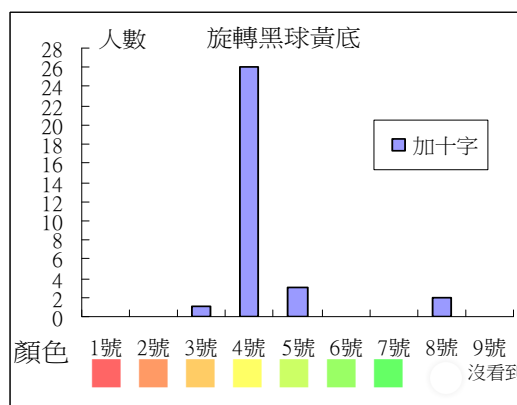
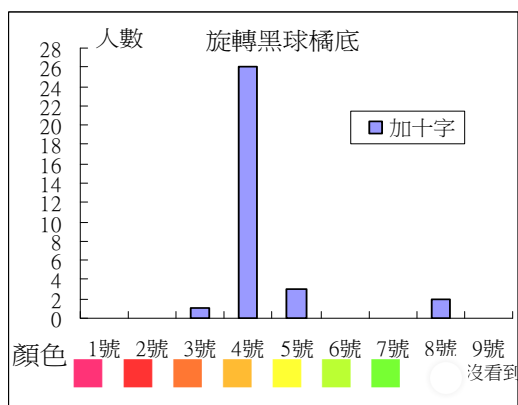
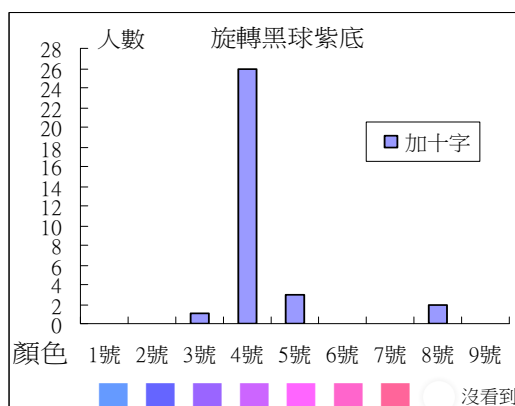
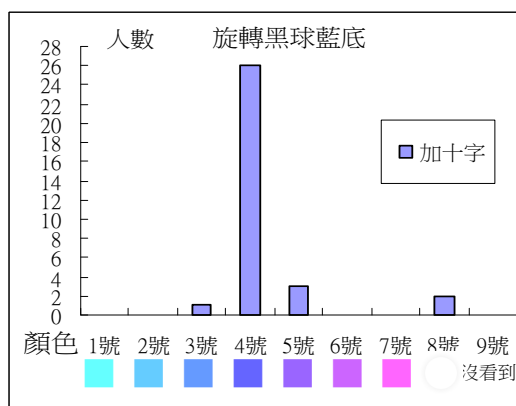
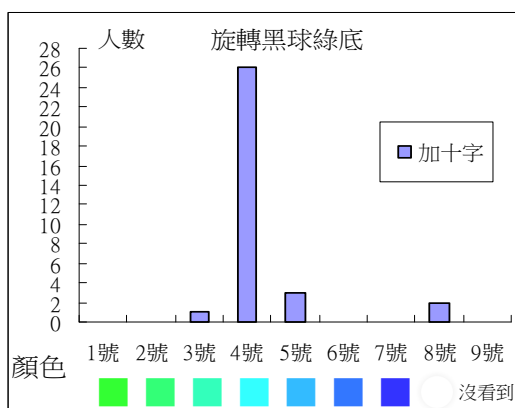
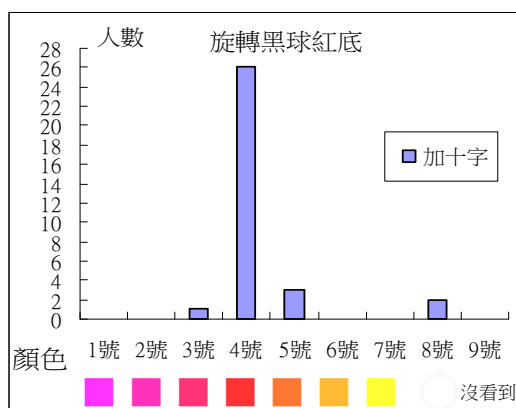


圖 25、旋轉球黑紅底、綠底、藍底、紫底、橘底、黃底研究結果

→我們發現，黑色旋轉球原本沒有負片後像，但因負片後像產生相對較亮的區塊，負片後像顏色會接近底色且較亮。

(二) 方塊與鬼影

我們假設：在正方形圖片中，看到的人數會最多，其次三角形，最後六角形。

正方形	黑■(R0 G0 B0)	白□(R255 G255 B255)	紅■(R255 G0 B0)	綠■(R0 G255 B0)	藍■(R0 G0 B255)
圖例					
灰階值差	255.00	255.00	178.50	104.55	226.95
有看到(%)	100% 32 人	100% 32 人	100% 32 人	100% 32 人	100% 32 人
沒看到(%)	0% 0 人	0% 0 人	0% 0 人	0% 0 人	0% 0 人
加權平均顏色	R125G126B131	R175G175B172	R216G123B108	R121G228B121	R98G123B198
正方形 45 度	黑■(R0 G0 B0)	白□(R255 G255 B255)	紅■(R255 G0 B0)	綠■(R0 G255 B0)	藍■(R0 G0 B255)
圖例					
灰階值差	255.00	255.00	178.50	104.55	226.95
有看到(%)	100% 32 人	97% 31 人	94% 30 人	78% 25 人	100% 32 人
沒看到(%)	0% 0 人	3% 1 人	6% 2 人	22% 7 人	0% 0 人
加權平均顏色	R136G141B144	R194G194B196	R229G126B148	R125G238B119	R110G124B202
三角形	黑■(R0 G0 B0)	白□(R255 G255 B255)	紅■(R255 G0 B0)	綠■(R0 G255 B0)	藍■(R0 G0 B255)
圖例					
灰階值差	255.00	255.00	178.50	104.55	226.95
有看到(%)	97% 31 人	100% 32 人	88% 28 人	72% 23 人	94% 30 人
沒看到(%)	3% 1 人	0% 0 人	12% 4 人	18% 9 人	6% 2 人
加權平均顏色	R136G138B144	R167G164B160	R240G140B116	R134G242B138	R116G143B213
六角形	黑■(R0 G0 B0)	白□(R255 G255 B255)	紅■(R255 G0 B0)	綠■(R0 G255 B0)	藍■(R0 G0 B255)
圖例					
灰階值差	255.00	255.00	178.50	104.55	226.95
有看到(%)	12% 4 人	12% 4 人	25% 8 人	16% 5 人	25% 8 人
沒看到(%)	88% 28 人	88% 28 人	75% 24 人	84% 27 人	75% 24 人
加權平均顏色	R208G208B208	R220G213B203	R227G157B124	R110G252B86	R164G180B223

表 16、正方形、正方形 45 度、三角形、六角形方塊的鬼影研究結果

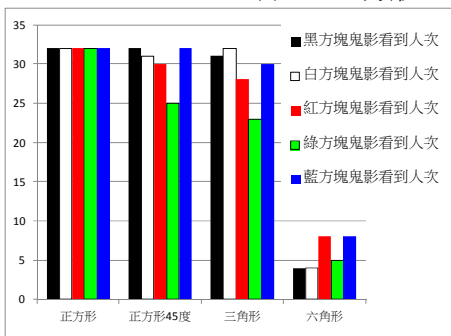


圖 26、鬼影研究結果

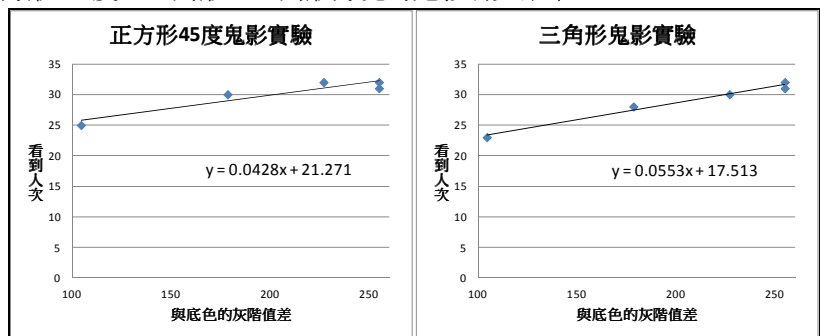


圖 27、正方形 45 度和三角形實驗中，看到鬼影的人次與灰階值差相關

→我們發現，在同樣是黑色鬼影的時候，鬼影的明顯程度，依序是正方形、正方形 45 度、三角形、六角形遞減；而同樣圖形時，鬼影明顯程度，依序是黑白、藍、紅、綠色遞減，可能與灰階值差有關。

方塊與底色的灰階值差造成的鬼影效果探討

我們假設：灰階值差越大，就越容易看到鬼影。

	灰■(R51G51B51)	灰■(R95G95B95)	灰■(R128G128B128)	灰■(R178G178B178)	灰■(R221G221B221)	灰■(R234G234B234)
圖例(左邊是黑■R0 G0 B0 對照組)						
亮度(灰階值)差	204.00	160.00	127.00	77.00	34.00	21.00
有看到(%)	100% 32 人	100% 32 人	100% 32 人	97% 30 人	91% 29 人	88% 28 人
沒看到(%)	0% 0 人	0% 0 人	0% 0 人	3% 2 人	9% 3 人	12% 4 人
加權平均顏色	R169G169B169	R172G172B172	R181G181B181	R207G207B207	R224G224B224	R234G234B234

表 17、對比研究結果

→我們發現，灰階值差越大，看到鬼影的人數越多；圖形的灰階值差越大，則鬼影的顏色也會越深。

(三) 盲點處是否會產生負片後像

我們假設：盲點位置不應該看到任何顏色，其成像原理是大腦的補償機制將周圍影像補齊空缺。我們猜想，盲點處的負片後像，有可能也會是大腦的補償機制產生。

尋找盲點	A 盲點處影像消失，變成周圍的顏色	B 聽不懂或沒看到	
	28	4	
盲點處的負片後像(有色塊)是否與周圍相同	A 盲點處有負片後像，但顏色是周圍的負片後像顏色	B 盲點處色塊產生負片後像，但與周圍負片後像顏色不同	C 聽不懂或沒看到
30 秒	19	10	3

表 18、盲點研究結果

→我們猜測，本來大部份的人都找到自己的盲點，但我們加上色塊之後，有些人的眼睛會亂飄，導致看到不同的顏色；不過實驗結果中，大部分的人在青色色塊處看到周圍紅色產生的青色負片後像，證實盲點處的負片後像也是大腦補償機制產生。

陸、討論

眼睛，是靈魂之窗，也是我們人類重要的視覺感官受器，帶領我們探索外界美麗的世界。但視覺也會騙人，像是國一生物課，我們學到的「負片後像」、物理現象「海市蜃樓」，沒接收到光卻看到影像的「盲點」，以及許許多多「視錯覺」、「誘動現象」等，都讓視覺變得不再單純，而且非常有趣。

為了更加了解「負片後像」，我們改良國一生物課本中「負片後像」的相關實驗，利用課餘時間，設計了八十個相關的實驗，並且拜託同學、學弟、學妹進行測試，希望將負片後像深入了解，更進而探討相關的視錯覺，以及了解盲點處的負片後像等。

我們知道，產生感覺疲勞的原因，是因為感覺該刺激的受器對其敏感度降低了，所以原有的刺激強度不再產生相同的反應，必須再加強刺激，中樞神經才會重新感覺到；此外，上電腦課時，我們學到了，只要電腦開著，電腦螢幕就會射出 RGB 三原色的光線；而國二自然課本中，我們學到了光的三原色和顏料的三原色並不同，而人的視覺細胞（視錐細胞）是依照光的三原色加以判斷的，但很可惜國一上生物課時，還沒有教光的三原色，因此關於負片後像的實驗也很難徹底了解。



圖 28、顏料色相環

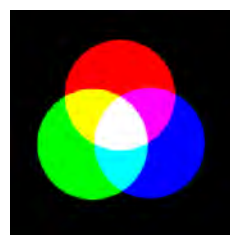


圖 29、光的三原色

從各種顏色的負片後像實驗結果顯示，紅色■(R255 G0 B0)的互補色較接近青色■(R0 G255 B255)，而非綠色；綠色■(R0 G255 B0)的互補色較接近洋紅■(R255 G0 B255)；藍色■(R0 G0 B255)的互補色接近黃色■(R255 G255 B0)，而不是橘色，這是因為課本、講義、考卷常以色彩學十二色相環（圖 28）解釋互補色，然而人類眼球上的視覺受器感應的是可見光（由紅、綠、藍組成），理所當然跟顏料顏色的互補色，呈現出不同的情形。

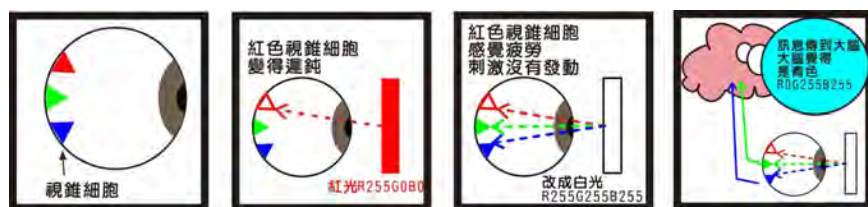


圖 30、負片後像的產生示意圖

觀察原色	紅色 ■ (R255 G0 B0)	綠色 ■ (R0 G255 B0)	藍色 ■ (R0 G0 B255)	紫色 ■ (R170 G0 B255)	橘色 ■ (R255 G170 B0)	黃色 ■ (R255 G255 B0)
負片後像的顏色	青色 ■ (R0 G255 B255)	洋紅 ■ (R255 G0 B255)	黃色 ■ (R255 G255 B0)	綠色 ■ (R85 G255 B0)	淺藍色 ■ (R0 G85 B255)	藍色 ■ (R0G0 B255)
5 秒加權後負片後像顏色	青色 ■ (R0 G239B222)	洋紅 ■ (R236 G0 B195)	黃綠色 ■ (R205 G243 B0)	綠色 ■ (R179 G255 B0)	淺藍色 ■ (R0 G151 B243)	藍色 ■ (R44 G91 B255)
10 秒加權後負片後像顏色	青色 ■ (R0 G222 B234)	洋紅 ■ (R252 G0 B197)	黃綠色 ■ (R181 G244 B0)	綠色 ■ (R154 G252 B0)	淺藍色 ■ (R18 G109 B249)	藍色 ■ (R85 G56 B255)
30 秒加權後負片後像顏色	青色 ■ (R0 G241 B215)	洋紅 ■ (R236 G0 B222)	黃綠色 ■ (R183 G239 B0)	綠色 ■ (R145 G255 B11)	藍色 ■ (R47 G82 B250)	藍色 ■ (R93 G48 B255)

表 19、各種顏色的負片後像

從改變不同顏色深淺對實驗影響的觀察結果顯示，在白底上，所產生的負片後像顏色會較淡，而觀察時間越久，顏色會越深，色彩也會越明顯

從改變觀察時間對實驗影響的結果顯示，人類的眼睛在觀察一個物體長時間時，會產生視覺疲勞的現象，我們使用實驗結果的加權平均值，推算出 RGB 的視覺疲勞比例，結果發現，觀察時間越久，RGB 的疲勞比例會越高，看到的顏色也會越深，而相同觀察時間，疲勞比例最高是藍 B，其次是綠 G，最後則是紅 R，我們推測，人類視錐細胞接收的波長，未必等於電腦螢幕上各種顏色的波長，且視錐細胞接收的也不是單一波長的光，而是一個區段的光。

我們假設，紅球(255G0B0)因為負片後像的顏色本來就是(R0G255B255)，因此在綠底或是藍底上不應該有負片後像，但在改變底色的實驗觀察結果顯示，在綠底及藍底時，人眼仍然接收到紅光，使得負片後像仍然產生，是比底色量一些的颜色，綠球紅藍底、藍球綠紅底也有相同的情形，如果改成其他色球也一樣，負片後像都是比底色略亮的顏色。

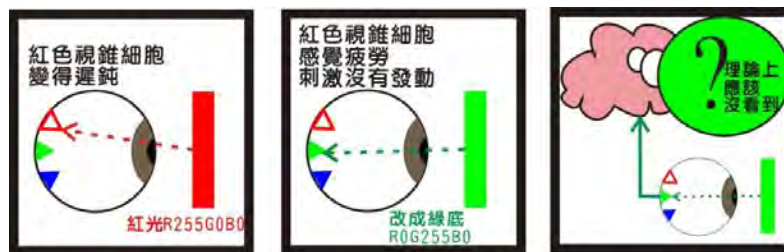


圖 31、紅球綠底負片後像的產生示意圖

從黑底實驗的觀察結果顯示，理論上黑底時是不會產生負片後像的，但在黑底時，我們還是有看到不太容易辨識的負片後像顏色，我們推測，是因為螢幕在黑暗狀態並非完全呈現黑暗，射出了些許光線，視錐細胞雖已感覺疲勞，但因光線太微弱而造成偏差。不過觀察時間越長，灰階值會越高，顏色也會越亮，我們猜測，這是因為在黑暗中眼睛的瞳孔會放大，所以觀察時間越久，看到的顏色就越亮。

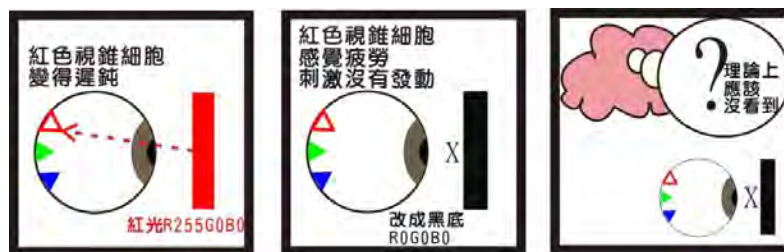


圖 32、紅球黑底負片後像的產生示意圖

從黑球白底實驗的觀察結果顯示，理論上黑球並無任何負片後像，但因相對視覺的關係，仍會產生很淡的負片後像，產生白白亮亮的球，周圍有像光暈的陰影，另外，人在長時間盯著同一種物體時眼睛會亂飄，導致有一些人在看完實驗後會出現較大的陰影。而在改變底色後，底色的顏色會和黑球的負片後像顏色疊合，導致顏色會接近底色。

從單眼觀察顏色深淺實驗的觀察結果顯示，雙眼觀察的亮度值比單眼觀察的亮度值高，而疲勞比例比單眼觀察時來得低，用左眼觀察的亮度值、疲勞比例和用右眼觀察的亮度值、疲勞比例並無明顯的差異。

我們認為旋轉球錯覺是負片後像的一種應用，當球在旋轉時，留下的空缺會產生互補色因而產生錯覺。從旋轉球實驗的觀察結果顯示，顏色準確度由高到低，最高的是〔轉速 0.1 秒/頁〕加導引視覺的十字，而〔轉速 0.1 秒/頁〕和轉速〔0.5 秒/頁〕差不多。我們推測，旋轉球在 0.1 秒時已有許多人看見準確的顏色，但是在加上十字引導後，因為有目標可以注視，讓眼睛不會亂飄，所以顏色準確度增加；而轉速 0.1 秒和轉速 0.5 秒並沒有因為改變轉速而有明顯差異。



圖 33、旋轉球的負片後像

我們閱讀有關鬼影的科展作品《眼見為憑?!-動、靜態視覺形成之探討》，了解鬼影形成的原因，可能是因為眼球顫動所造成的，文中提到：鬼影產生和色塊與背景顏色灰階值差、方塊與道路比例有關，我們將其實驗的優點保留，並多做出三角形、正方形 45 度角、六角形，並改變方塊顏色。我們認為鬼影錯覺也是負片後像的一種應用，方塊產生模糊的負片後像之後，在負片後像之間留下一個缺口，在視覺上產生一個相對應的顏色，因而產生錯覺。



圖 34、鬼影的生成原因

從鬼影實驗的觀察結果顯示，我們推測，鬼影顏色深淺的清楚與否跟形狀和角度有很大的關係，正方鬼影較容易看到的原因可能是因為形狀整齊，且人是左右雙眼視覺，當眼球左右上下晃動時，容易產生模糊的負片後像及鬼影，而六角形和三角形因為形狀沒有很整齊，所以比較不容易看見。至於鬼影顏色的深淺，可能跟圖形的顏色有所關聯，結果顯示，灰階值的差越大，產生看到鬼影的人數也越多，所以我們用了圖表來表示灰階值差和看到人次的關係，圖表顯示，灰階值差和看到人次的關係相關。

從盲點實驗的觀察結果顯示，因為存在個別差異，每個人的盲點位置可能不同，且每個人的視野範圍不同，再加上聽不太懂說明而不會調整位置，導致少部分人找不到盲點，但不是無盲點。有一部分的人，雖然找得到盲點，卻因為需要長時間注視一黑點，眼球會亂飄，導致盲點位置會產生不同的顏色；但正確觀察的人都說出了盲點處的負片後像與周圍顏色負片後像相同，代表盲點處的負片後像其實未成像，其影像可能是大腦想像出來的。

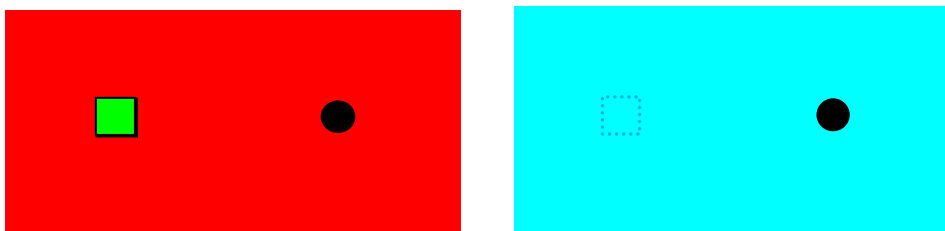


圖 35、盲點負片後像

我們也與相關專家學者討論本實驗，他提出了一個很棒的問題：關於色盲、色弱人士是否可以此實驗？我們認為應該可以，但做出來的數據肯定會跟一般無色盲或色弱的人不同，所以不能跟一般正常人的數據一起平均，但可將兩種數據拿來比較、討論。本實驗的施測對象都是視覺正常而無色盲的同學，但「色盲者的負片後像探討」說不定是日後值得研究的題材！

經過這一整年負片後像的實驗後我們認為，國一生物課本上實驗的答案，應該有些偏差，我們希望有機會的話可以請老師在上課時，使用我們的標準化觀察情境，做出更準確的實驗。



圖 36、課本上的實驗結果和本實驗的研究結果

柒、結論

- 一、負片後像是因為不同視錐細胞感覺疲勞所致，人類視錐細胞有紅綠藍三色（光的三原色），負片後像看到的顏色是原色的互補色（R255G255B255 減原色）
- 二、長時間盯著某物，視錐細胞會疲勞，觀察時間越久，看到的顏色會越深，RGB 疲勞比例也會越高，疲勞比例最高是 B，其次是 G，最後則是 R。
- 三、視錐細胞疲勞比例公式（紅、綠、藍球白底）：

看 5 秒的顏色 R' G' B'

$$R' = 255 - (R \times 0.2745) \quad G' = 255 - (G \times 0.3333) \quad B' = 255 - (B \times 0.3647)$$

看 10 秒的顏色 R' G' B'

$$R' = 255 - (R \times 0.3832) \quad G' = 255 - (G \times 0.451) \quad B' = 255 - (B \times 0.5608)$$

看 30 秒的顏色 R' G' B'

$$R' = 255 - (R \times 0.5451) \quad G' = 255 - (G \times 0.5804) \quad B' = 255 - (B \times 0.6118)$$

- 四、所有顏色在白底時，大都可產生明顯的負片後像；可是在黑底時，因為只有從螢幕產生的微弱光線，所以產生的負片後像顏色就不太容易辨識。

- 五、背景顏色會影響負片後像的顏色，使負片後像顏色接近底色。紅、綠球在不同底色時，負片後像顏色會和底色相同，但比底色亮，藍球的負片後像顏色則會有一點疊合底色，產生接近底色的負片後像顏色；而紫球在不同底色上，負片後像顏色則會和底色疊合，產生特別的顏色。
- 六、雙眼觀察的亮度值比單眼觀察的亮度值高，而雙眼觀察時疲勞比例比單眼觀察時來得低，用左眼觀察的亮度值、疲勞比例和用右眼觀察的亮度值、疲勞比例並無明顯的差異。
- 七、旋轉球會因為轉速、有無引導影響顏色準確度，其準確度最高的是有引導，而轉速 0.1 秒和轉速 0.5 秒並沒有因為改變轉速而有明顯差異，另外，改變底色的旋轉球，因旋轉球產生的負片後像顏色被底色影響，會跟底色很接近。
- 八、鬼影的明顯程度最佳是正方形，其次是三角形，最後是六角形，依顏色則是黑白、藍、紅、綠色，無傾斜的方塊明顯度大於傾斜的方塊。
- 九、灰階值的差越大，就會越容易看到鬼影；RGB 的值越小，所看到的鬼影顏色會越深。
- 十、灰階值的差和看到人次的關係是高度正相關。
- 十一、因為存在著個別差異，每個人盲點的位置都不相同，且盲點處仍有負片後像，且顏色和旁邊負片後像顏色相同，我們推測，盲點處的負片後像可能是大腦想像出來的。

捌、參考文獻

1. 蔡承諭、林育堂、吳文泓（2009）眼見為憑？！-動、靜態視覺形成之探討。中華民國第 49 屆中小學科學展覽會高中組生物科。
2. 翰林 選修生物(下)中華民國 99 年 2 月初版二刷
3. 光的三原色 http://www.ctk.com.tw/jackweb/graphic/Knowledge/element_color.htm
4. 視錯覺-A+醫學百科 <http://cht.a-hospital.com/w/%E8%A7%86%E9%94%99%E8%A7%89>
5. 視錐細胞、視桿細胞 - A+醫學百科
<http://cht.a-hospital.com/w/%E8%A7%86%E9%94%A5%E7%BB%86%E8%83%9E#.Ua2yQtJT5AI>
6. 盲點-維基百科 [http://zh.wikipedia.org/wiki/%E7%9B%B2%E9%BB%9E_\(%E7%9C%BC\)](http://zh.wikipedia.org/wiki/%E7%9B%B2%E9%BB%9E_(%E7%9C%BC))
7. 何謂視覺疲勞？ <http://www.phy.ntnu.edu.tw/demolab/phpBB/viewtopic.php?topic=23111>
8. 色盲-維基百科 <http://zh.wikipedia.org/wiki/%E8%89%B2%E7%9B%B2>
9. 色盲-A+醫學百科 <http://cht.a-hospital.com/w/%E8%89%B2%E7%9B%B2>
10. 瞳孔-A+醫學百科 <http://cht.a-hospital.com/w/%E7%9E%B3%E5%AD%94#.UalnINJT5AI>
11. 伊登 12 色相環:<http://www.pws.stu.edu.tw/cardend/HTM/english/Itten.htm>

【評語】 030320

優點：

1. 主題創意新穎，可將其應用在生物課本教學上，可再進一步深入研究，應用在日常生活中。
2. 研究過程辛苦，值得鼓勵。

缺點：

1. 實驗器材宜再考慮其對結果的準確性。
2. 架構完整，但研究項目多，容易失焦。
3. 實驗設計與討論宜再嚴謹，使結果更具客觀性。