

# רואים צבעים

## על צבעים ועצבים

בחלק מהם. יתר על כן – פעמים רבות אין הסכמה לגבי טיבם: זה אומר ורוד, וזה אומר כחלחל. ובכל זאת, עם כל עמימותם, צבעים "לא-קרואים" יכולים לפקוח את עינינו בשאלה "מהו צבע?"

### צבעים שבגוף – או בנפש?

סוג אחד של צבעים "לא קרואים" הם צבעים אֶנְטֵאוֹפְטִיִים, צבעים שמקורם פנימי, "בגוף עצמו" ולא בגירוי אור חיצוני. אם אעצום עין אחת ואגע בקצה הזרת בעפעף הסגור, בזווית הפנימית של העיץ העצומה סמוך לאף, יתגלה לי מיד עיגול שצבעו כחול כהה המוקף בטבעת דקה שצבעה צהוב בוהק. העיגול הכחול והטבעת הצהובה המקיפה אותו עוקבים אחר תנועות קלות של קצה הזרת על העפעף. נסו זאת בעצמכם, בעדינות, ובעוצמות רקע שונות. לא כולם רואים זאת, אך אני משוכנע שאינני היחיד שרואה "צבעים יש מאין" (יש מעין?) אלה.

סוג שני של צבעים "לא קרואים", "צבעים סובייקטיביים", הם צבעים שנובעים מגירויים חזותיים (ויזואליים), אלא שהגירויים הם "נייטרליים", לאמור – "חסרי צבע" כשלעצמם. למשל, כשמתבוננים זמן-מה בקווים שחורים אלכסוניים, מופיעים צבעים – חיוורים אמנם, צבעי פסטל. גירוי חזותי כזה להשריית "צבעים סובייקטיביים" הוצע לראשונה ב-1933 ומכונה "דמות לוקיאש-מוס" (Luckiesh-Moss). אנשים רבים המתבוננים בדמות לוקיאש-מוס חוֹיִים כעבור זמן

לפני מספר שנים נתבקשתי לכתוב על ראיית צבעים עבור רבעון לנוער. התלבטתי באיזו דרך לפתוח, עד שלבסוף החלטתי להתחיל באגדה תוצרת-בית אודות טיול לאי באוקינוס, האי איגֶן, שבו נעלמים הצבעים כליל – טיול שהופך סיוט. והנה, זמן מה לאחר שהמאמר ראה אור וצבע, פורסם ספרו של הנורולוג-ההרפתקן אוליבר סאקס "האי של עוורי הצבעים" (ראו: לקריאה נוספת). אמנם, באי של סאקס הצבעים אינם נעלמים אלא "דק" מרובים בו עוורי הצבעים, ובכל זאת חשתי כאילו סיפור אגדה הפך לפיסת מציאות.

ראיית צבעים היא נושא מרכזי בחיי היומיום, באמנות, בטלוויזיה, בעיתונות הכתובה (והמאד צבעונית, וגם הצהובה) ובהוצאות הספרים, באופנה, בשוק הפירות, במחשבים, בתעשיית המזון, בצילום, באבחון רפואי, בתעשייה הכימית; והנה, שוב אין לי מושג ירוק במה מכל אלה להתחיל. לכן אפתח דווקא באפור-אפלולי של סרט בלשי, שבו כל התסבוכת מתפענחת, בסופו של דבר, הודות למשהו לכאורה שולי – מספר גרגרי חול ים שנעליו של מי שלא עזב את ביתו בהרים, מעט רמץ באח שלא דלקה. כאן יהיו אלה צבעים "לא קרואים", צבעים ש"לא צריכים להיות".

הצבעים ה"לא קרואים" הם במקרים רבים עמומים. הם אינם עזים כדם, נָרד או תפוז; יש אנשים שלא מבחינים

### מאת צבי עצמון

למן המאה ה'17

תרמו טובי

המדענים לפענוח

חידת הצבעים.

עיקר המאמץ

מופנה כיום

לתהליכים עצביים

ולאתרים מוחיים

המעורבים בראיית

צבעים. עליהם,

וגם על גילויים

יומיומיים

שעשויים להפתיע

התבוננות למשך זמן מה  
בדמות לוקיאש־מוס משרה  
באנשים רבים תחושה של  
צבעים רכים

**פעילות מוחית היא  
שמשרה בנו את  
התחושות השונות,  
כולן, כולל תחושות  
הצבע**

"הגלגל" הצבעוני הזה, ובכללם יצרן הצעצועים Benham, שגילה לעצמו את התופעה ב־1894; רבים מכנים את הדמות "סביבון פְּנָהאם".

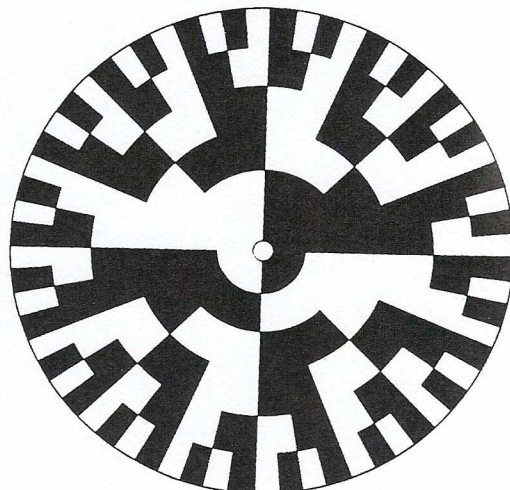
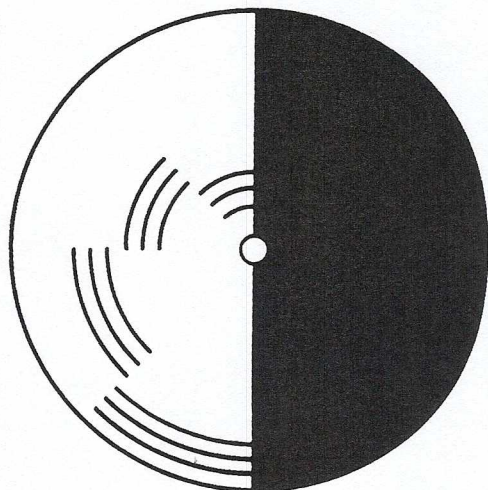
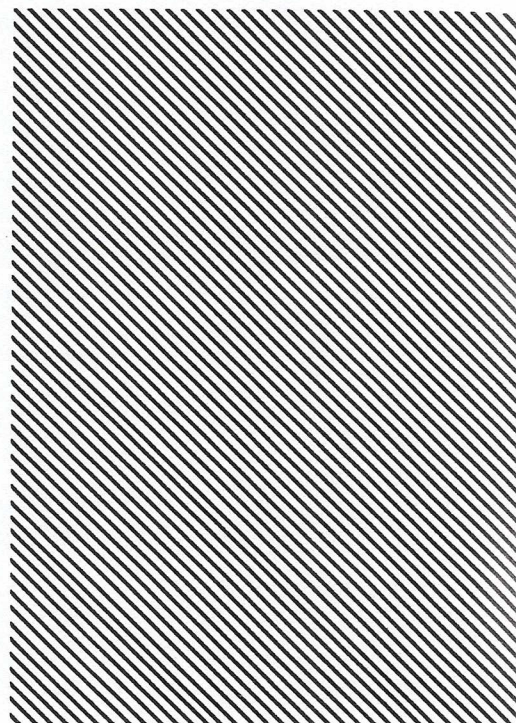
כדי לחוות בצבעים מתוך דמויות שחור־לבן אלו יש צורך לסובבן במהירות מתאימה. מדובר במהירות סיבוב נמוכה יחסית, בסיוע פטיפון (היה פעם דבר כזה!), מברגה, או בעזרת סיבוב ידני על ציר, למשל עיפרון. מי שאינו רוצה להתאמץ יכול לחוות זאת במתקן מוכן באחד ממוזיאוני המדע, וכיום אין צורך להרחיק מעבר לזנבו של עכבר המחשב המוביל למוזיאון וירטואלי. הנה כתובת<sup>1</sup> בה תוכלו לבצע את הניסוי ללא כל טרחה:

<http://dogfeathers.com/java/fechner2.html>

תנועה סיבובית היא תנועה קלה להפקה מבחינה מכאנית. ואולם כשלא כבולים למנגנונים מכאניים, ניתן לחוות צבעי פכנר גם בתנועה קווית. הנה הכתובת לגרסה קווית של הניסוי:

<http://dogfeathers.com/java/fechner.html>

מנגנוני הראיה האחראים להופעת צבעי אשליה בדמות לוקיאש־מוס ובדמויות פכנר־בנהאם אינם מחוברים במלואם,



ובוודאי שאין להם הסבר פשוט; בהמשך נפרט מעט. אבל נדמה שבשלב זה ניתן להגיע למסקנה: צבעי האשליה הם פועל־יוצא של פעילות עצבית־מוחית. פשוט אין הסבר אחר. כבר בשלב זה אני מבקש לגלות לכם, בסוד, שבסופו של סיפור המתח הטענה תהיה כי לא רק צבעי אשליה "סובייקטיביים", אלא כל הצבעים שאנו חשים – כולל צבע הדם, הוורד, התפוז והדגל, השמים והשדות – כולם פועל־יוצא של פעילות מוחית. נרשום לפנינו: בשלב זה

קצר פסים ורודים־כתומים ופסי טורקיז (כחלח־ירקרק) לסירוגין; לאחרים מתגלים צבעים אלה לא כפסים אלא כרשת, ויש החווים את הצבעים רק כשהם מזיזים מעט את דמות הקווים. כיצד מגיחים צבעים אלה מתוך גירוי השחור־לבן הנייטרלי?

אנשים רבים מיטיבים לראות צבעים לא קרואים, "צבעי אשליה", אם הגירוי החזותי נמצא בתנועה. צבעי־אשליה כאלה מכונים צבעי פְּכֶנֶר (Fechner). הפיסיקאי־פסיכופיסיקאי־פילוסוף הגרמני, בן המאה ה־19, גוסטב תיאודור פכנר, הוא שתאר לראשונה צבעי־אשליה אלה ב־1838. ואולם, לפחות 12 איש "המציאו" מחדש את

1. אני מודה לרפאלה בלאס מרשת עמלנט (<http://www.amalnet.k12.il>) עבור כתובת זו ורבות אחרות בתחום הראיה.

דמות בנהאם (מימין) משרה תחושות צבע כשמסובבים אותה. כיום משתמשים (משמאל) בדמויות שחציון שחור והחצי השני לבן ובו קווים מתאימים. אפשר לצלם את הדמויות שכאן ולסובבן

אפור). במקרים רבים נראית דמות כתם הצבע, אלא שצבעה הוא הצבע הנגדי (כעין "צבע הפוך" לצבע הגירוי).

צבעי גרר שליליים יכולים להיות "בלתי אפשריים". אם מביטים במשטח הכי צהוב שיכול להפיק הדפוס לאחר התבוננות בכתם כחול, ניתן לחוות ב"יותר צהוב מצהוב". כדאי להזכיר גם את הצבעים אותם חווים הסינֶסְטֶטִים, שצייר המופשט נְסִילִי קנדינסקי הרבה לשבח את רגישותם – יש מהם החושים צבעים כתגובה למוסיקה, כתגובה לכאב או לאותיות וספרות (וראו: בראד למלי, "אותיות טעימות, כאב כתום", גליליאו 39).

כשם שצבעים יכולים להופיע "יש מאין", צבעים יכולים גם להתפוגג, להיעלם כאילו בלעה אותם אדמת איגוון: אם שדה הראיה כולו מוצף בצבע בולט אך אחד לחלוטין, ללא שום גבול עם גוון אחר, כעבור זמן קצר הצבע מתערפל והולך עד שהוא נעשה דהוי ונמוג כליל. ניתן להדגים זאת בעזרת כדור פינג־פונג חתוך בחציו וצבוע היטב המכסה עין אחת, כשהשניה עצומה. ועוד זאת, אוליבר סאקס (ראו: לקריאה נוספת) מספר כי בילדותו סבל מהתקפי צילחה (מיגרנה) שבמהלכם חווה דקות של היעלמות תחושות צבע; רבים מן הסובלים מצילחה דווקא חושים לפני בוא הכאב הבזקים של צבעים עזים.

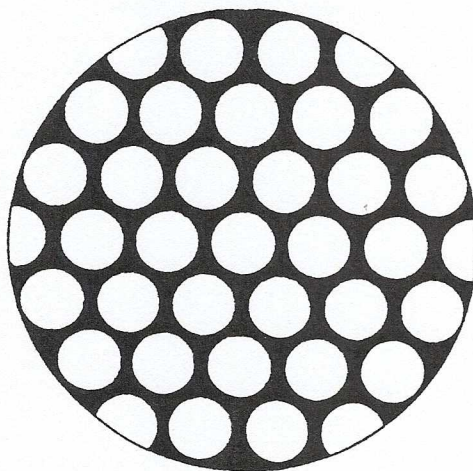
## הגדרות שליליות

עכשיו, מצוידים בשפופרות של צבעי אשליה, נוכל לתהות: מהו צבע? אולי נפתח בתשובות שליליות: צבע איננו חומר, אף לא חומר־צבע (צבען, פיגמנט); צבע גם איננו אורך־גל של אור, ואפילו לא תערובת של אורכי־גל. כיצד נוכיח שצבע איננו חומר, איננו צבען? קחו למשל ספר צבעוני

קשרנו תחושת צבע לפעילות עצבית־מוחית, ולא למושגים כמו אורך־גל של האור או צבען (פיגמנט, חומר צבע).

## צבעים שליליים

לפני שנגיע לצבעים ה"אמיתיים" ראוי שלא להלבין את פניהם של עוד שני סוגים של צבעי אשליה: צבעיו של סְקִינֶר וצבעי־גרר שליליים. הפסיכולוג־הביהוויוריסט הנודע ברוהוס פרדריק סְקִינֶר (Skinner) גילה בשנת 1932 כי



רבים מן האנשים, כשהם מתבוננים מבעד לנקב סיכה במשטח שחור הזרוע עיגולים לבנים, רואים את העיגולים הלבנים כאילו נצבעו בצבעים רכים, צבעי פסטל. אנשים שונים מדווחים על ורוד, ירקרק, תכלת או צהוב, ויש הרואים עיגולים בצבעים מתחלפים.

התבוננו בתמונה זו מבעד חור שניקבה סיכה בנייר אטום. ההתבוננות צריכה להיעשות כך שדמות העיגול הגדול ממלאת פחות או יותר את כל שדה הראיה. מה צבע העיגולים?

סגול +

+

של מתכונים מפרי הארץ, ופתחו בערך תפוז. הכתום־הכתום הזה מזנק מול עיניכם מִבֵּין הדפים. עתה גשו לסלסלת הפירות ובחרו תפוז נאה, והעמידו זה לצד זה, פרי ותמונה. הצבעים זהים, הלא כן? אינני מומחה לביוכימיה של תפוזים ולטכנולוגיות דפוס, ובכל זאת אני יכול להבטיחכם כי בעת הדפסת תמונת התפוז לא השתמש הדפס בצבענים (פיגמנטים) שמקורם בתפוז, כשם שברור שבהדפיסו את התמונות בפרק "מלפפון ירוק" לא השתמש בכלורופיל! ואף זאת, ברור כי כדי להשיג את כתום התפוז השתמש

דמות־גרר (afterimage) היא דמות המופיעה לאחר שהגירוי עצמו פסק מלהתקיים. מבחינים בין דמויות־גרר חיוביות, בהן הגירוי כאילו ממשיך להתקיים לאחר היעלמו, לבין דמויות־גרר שליליות. באלו, לאחר שנעלם הגירוי עצמו נותר כעין "צל" שלילי שלו. למשל, סיבוב ממושך בכיוון אחד יכול להשרות, לאחר שפסק, תחושה של סיבוב בכיוון ההפוך. דמויות־גרר צבעוניות מופרות מחיי יומיום וקל מאד להשרותן. מתבוננים זמן־מה בכתם צבע ואז מתיקים את המבט למשטח "נייטרלי" מבחינת צבע (לבן,

צבע גרר שלילי: ממקדים את המבט לזמן מה בסימן הפלוס שמשמאל, ואז מתיקים אותו לסימן הפלוס שממין. מהיכן הופיעו צבעים על רקע המשטח הימני הלבן?

דגל שלילי? – מתבוננים זמן  
מה במגן־דוד ואז מתיקים את  
המבט למשטח שמימין

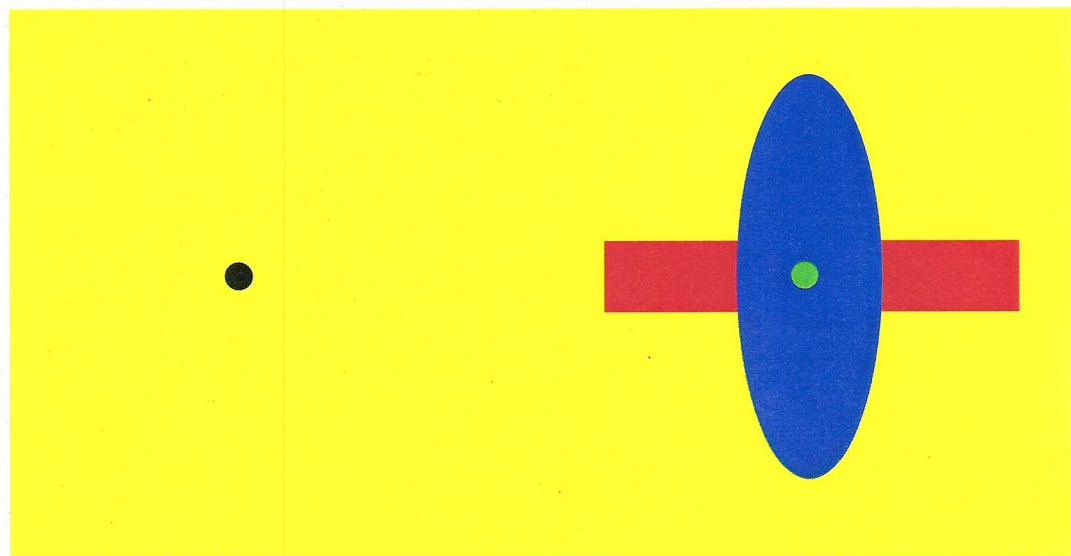
מדובר, כאמור, בחומרים שונים בתכלית. צבעים הנראים לנו זהים למרות שאורכי־הגל היוצרים אותם שונים מכונים צבעים תואמים (מְטָמְרִים). אבל נדמה שאת דוגמת התפוז כבר סחטנו עד תום; נצא אם כן להתאורר קצת בעולם, ונביט בבית הלבן. הוא נראה

הדפס בתערובת צבענים, שכל אחד מהם כשלעצמו בעל צבע שונה לחלוטין מצבע התפוז. המסקנה היא, אם כן, שצבע הוא משהו שונה לגמרי מחומר צבע, מצבען. צבע גם איננו אורך־גל. אין שום אורך־גל שצבעו ורוד, למשל, תכלת, ארגמן, או לבן. אמנם, יש תערובת של



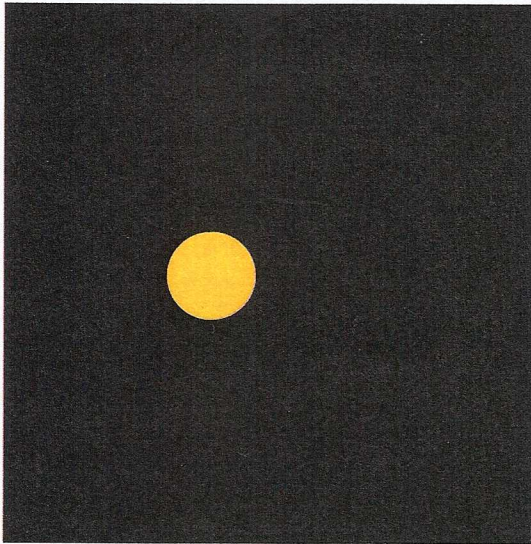
לבן כשמתבוננים בו מן הרחוב הוויינגטוני ביום שמש בהיר, ונראה לבן גם על צג הטלוויזיה. אלא שאני יכול להבטיחכם שחור על גבי לבן, כי תערובת אורכי־הגל המגיעה לעיניכם מן הקיר שונה מאד מן התערובת המגיעה מצג הטלוויזיה. במקרה הראשון מדובר ברצף של כל אורכי הגל הנראים לעין (אור שבקע מן השמש, פגע בקיר והוחזר לעיניים), בעוד במקרה השני מדובר בתערובת הבוקעת מן האלמנטים הזוהרים שמרוחים על צג הטלוויזיה, שפולטים אור כשפוגעים בהם אלקטרונים. מה משותף, אם כן, לתערובת צבעני הדפוס ולקליפת התפוז? לבית הלבן הנראה עין־בעין ולבית הלבן בטלוויזיה?

אורכי־גל הנראית ורודה, יש תערובות שצבען תכלת, ויש שצבען לבן וכאלו שהן ארגמניות. ובכל זאת, צבע גם איננו תערובת של אורכי־גל; אחד הנימוקים לכך הוא החום. לשווא תחפשו תערובת אורכי־גל שצבעה כצבע אדמת פרדס דשנה, חומה. אין. וגם זאת: לא רק שצבעני הדפוס שונים בתכלית ממה שנמצא בקליפת התפוז, אלא גם תערובת האורות (אורכי־הגל) המגיעה לעינינו מקליפת התפוז שונה מתערובת אורכי־הגל המגיעה לעינינו מתמונת התפוז. מכשיר מדידה פיסיקלי שהיה בוחן אילו אורכי־גל מגיעים מן הקליפה ואילו אורכי־גל מגיעים מן התמונה היה מדווח על הַבְּדֵל ניכר; הדבר לא צריך להפתיע, שהרי



קיומם של צבעים  
תואמים (מְטָמְרִים)  
מפקיע את המושג  
"צבע" מתחום  
הפיסיקה לטובת  
הניורוביולוגיה  
פסיכולוגיה

"על־צחוב" כצבעי־גרר שלילי.  
מתבוננים זמן־מה בעיגול  
הירוק ואז מתיקים את המבט  
לעיגול השחור



ראיה, כ"אשליה". "תעתוע" כזה הוא, במקרים רבים, תכלית רצויה, כמו צבעי התפוז והמלפפון בספר הבישול, צבע השקיעה בסרט רומנטי והבית הלבן בחדשות הטלוויזיה.

### שחור ולבן – בצבעים

מסגרת התמונה הושלמה, אם כן: צבע הוא תחושה סובייקטיבית, שהיא עצמה ביטוי לפעילות מוחית ספציפית: פעילות מוחית זו מושרית כרגיל על ידי גירוי אור שמגיעים מעצמים שונים (כולל ספרים, תמונות וצגי טלוויזיה) אל העיניים, שמוסרות מידע עצבי למוח. ואם המסגרת הושלמה, נוכל עכשיו להיכנס פנימה לתמונת הצבע. אך ראוי להבהיר ענייני מינוח בסיסיים. המושג "צבע" והאפיון "צבעוני" שונה מתחום לתחום, מעיסוק לעיסוק. סוחר הבדים מבחין בין בד לבן לבד צבעוני; גם הצבע ישאל האם אתה מעדיף את הקיר לבן או צבעוני, כולל שחור ("אדוני, אם הטעם שלך זה שחור, בבקשה!"). לעומתם, הבוטנאי מבחין בין פרח ירוק לבין פרח צבעוני – עבורו פרח הוא "חסר צבע", נבלע ברקע העלים, ואילו פרח לבן (חסר פיגמנט! מחזיר את כל האור הפוגע בו) הוא בולט וצבעוני, וכך גם פרח נדיר שצבעו שחור.

ומהי שיטת הסיווג הראויה לכאן? ראשית, התחושה השונה במובהק מן האחרות היא תחושת השחור. תחושת השחור מקורה בפעילות מוחית בתגובה לחוסר אור (יחסי). ניתן, אם כן, להבחין בין התחושות הנגרמות על ידי אורות המגיעים לעין לבין תחושת השחור, הנגרמת מחוסר אור. ואולם חשוב לשים לב למה שבסוגריים – חוסר יחסי באור: אזור בשדה הראיה ממנו מגיעים לעיניים פחות מ-3 אחוזים לערך מעוצמת הרקע משך בנו תחושת שחור. המשמעות יכולה להיראות תמוהה. ניח שאצא עם גיליון

לצבעים ה"אמיתיים" של התפוז, המלפפון והקיר ולצבעי האשליה שחווינו? אם נמחק מן הרשימה את כל מה ששללנו, ניוותר עם אפיון אחד: תחושה. אכן, נדמה כי הדרך היחידה להגדיר צבע היא תוך שימוש במלה תחושה. כתום התפוז הוא סוג של תחושה, תחושה שכרגיל מושרית בנו כשאנו מתבוננים בתפוזים, אך שיכולה להיות מושרית גם בדרכים אחרות – התבוננות בתערובת הדפוס, בפרי מכחול של צייר מוכשר, הסתכלות במשטח אפור – כצבע גרר (לאחר שמיקדנו את המבט בכתם שצבעו נגדי לזה של התפוז), או בחלום, בהזיה, או בעקבות גירוי ישיר למוח (השמלי, למשל). אכן, המוח קשור קשר הדוק לתחושות הצבע, כמו גם לכל שאר התחושות – פעילות תאי העצב שבמוח היא שמשרה בנו את התחושות השונות, כולן, כולל תחושות הצבע.

אבל אם צבע הוא סוג של תחושה, הרי שכל צבע, לא רק צבעי פֶּכֶן וצבעי אשליה אחרים, הם צבעים "סובייקטיביים". שהרי תחושה איננה ניתנת לבחינה אובייקטיבית, פומבית וחיצונית, אלא היא משהו שחווים באופן בלתי-אמצעי, פנימי, סובייקטיבי.

אם צבע אינו אלא תחושה סובייקטיבית, מה מעמדם של העצמים הצבעוניים שבעולם האובייקטיבי? – שהרי מה שבאמת חשוב לעצם קיומנו זו הבחנה בפרי האמיתי מבעד לעלים הירוקים, הבחנה בין פרי ירוק מקה שיניים לבין תפוז כתום בשל ובינו לבין פרי שהעלה עובש שחור; הבחנה בדם על העור, בצבעי אזהרה של נחש ארסי ובצבעי הרמזור. ובכן, כרגיל הגירויים החיצוניים הם אלה שמעוררים – דרך העיניים ושרשרת עצבית – את הפעילות המוחית שמשרה בנו את תחושת הצבע. אלא שפעילות זהה ניתן להשרות גם כשהגירוי המקורי לא קיים, כלומר – כתעתוע

שני העיגולים זהים לחלוטין, ואולם בהשפעת הרקע, השמאלי נראה צהוב ואילו הימני – חום (כדי להעצים את האפקט כדאי לגלגל גיליון – רצוי כהה, בריסטול שחור – לגליל צר ולהביט דרכו לסירוגין בכל אחד מהעיגולים עם מעט מהרקע המקיף אותו)



הצבע שנראה לנו

בכל נקודה בשדה

הראיה הוא ביטוי

ליחס בין פעילות

שלושת סוגי

החרוטים באזור

המתאים

ברשתית העין

טובה לכינוי האפור "צבע נייטרלי". ההבדל בין אפור בהיר לאפור כהה הוא בעוצמה: גוף שמחזיר אחוז ניכר מקרינת האור הפוגעת בו נראה בהיר, ואילו גוף הבולע חלק ניכר ומחזיר לעינינו אך מעט (אך מבלי להעדיף אורכי-גל מסוימים על פני אחרים) נראה אפור כהה. וכיצד ייראה גוף שיחזיר מעט מאד, פחות מ-3%, מן האור הפוגע בו? שחור, כמובן. וגוף שמחזיר אחוז גבוה ושווה של כל אורכי-גל, והוא בהיר יותר מכל סביבתו? לא צריך להיות נשיא ארה"ב ולהתגורר בבית מפורסם כדי להשיב על שאלה זו – לבן. הווי אומר – סדרת האפורים, למן אפור כהה דרך אפור בהיר ועד הלבן, היא סדרת הצבעים הנייטרליים. והשחור? גם השחור איננו מפלה בין אורכי-גל; הוא מקנה תחושה כאילו שום אורך-גל לא מגיע ממנו, ולפיכך גם הוא שייך לסדרת האפורים. אבל אין בכך כל חידוש: תמיד ידענו כי לבן + שחור = אפור. ואכן, כשמביטים ממרחק מספיק גדול על לוח שחמט, לא רואים ריבועים שחורים וריבועים לבנים אלא משטח אפור אחיד.

### ניסוי הנפיצה – המפץ הגדול

בשלב זה הסכמנו כי הגדרת המושג צבע צריכה להיפתח כך: "תחושה ש...". ואולם את ניסוי התשתית הביסטוריה של חקר ראיית הצבעים לא ערך פסיכולוג אלא דווקא פיסיקאי, הפיסיקאי בה"א הידיעה – איסק ניוטון, בעזרת תריס בִּיתִי, קרן שמש ומנסרת זכוכית. הכוונה לניסוי נפיצת אור השמש, האור הלבן. היה זה בבחינת "המפץ הגדול" של חקר ראיית הצבעים, מפץ שרחשים ממנו מהדהדים ממש עד עצם ימינו אלה.

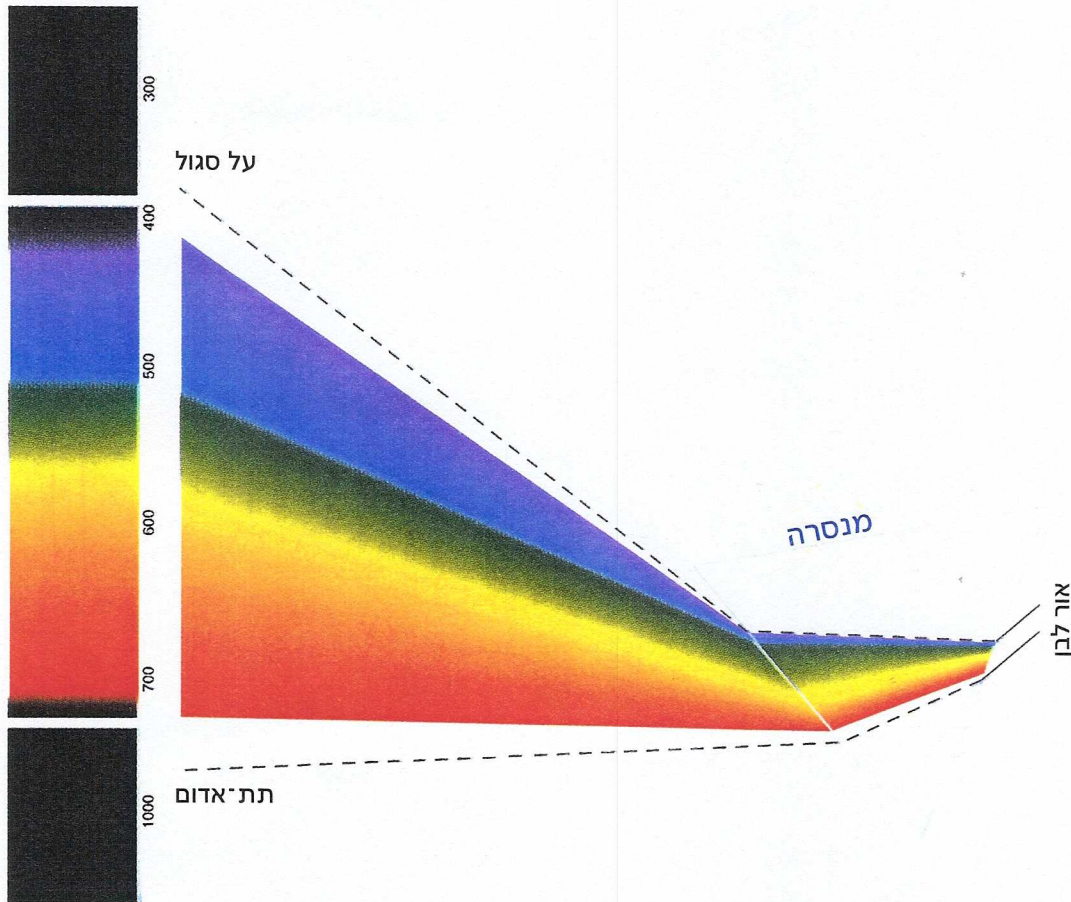
קרן אור השמש נפרדה במהלך מעברה במנסרת הזכוכית של ניוטון לסדרה של אורות צבעונים, סדרה המזכירה את צבעי הקשת-שבענון. מסקנתו של ניוטון היתה כי אור השמש איננו אור "טהור", כי אם תערובת הכוללת אורכי-גל שונים, שלכל אחד מהם כשלעצמו צבע שונה. מתוך הקרינה שאנו מבחינים בה כאור, זו שלה אורך-גל גדול (בסביבות 700 ננומטר) סוטה מעט-יחסית ממסלולה המקורי של קרן השמש; קרינה זו יוצרת בנו תחושה של אדום (למען הדיוק – אדום מעט כתמתם). לאור הנראה בעל אורך-גל הקצר (מעט פחות מ-400 ננומטר) סטייה גדולה מן המסלול המקורי, וצבעו סגול. בין שני ערכים אלה נפרשת כל הקרינה הנראית לאדם, פרישה צבעונית המכונה "ספקטרום" אור השמש". התחום 400-700 ננומטר (נ"מ) נחשב כתחום הראיה של האדם. השמש פולטת גם קרינה (רבה)

2. בעברית משתמשים לעיתים במונח "תחזית אור השמש", אך תחזית משמשת כרגיל במונח שונה לחלוטין. חסרונו הלשוני הבולט של המונח ספקטרום הוא צורת הריבוי: הריבוי הלטיני הוא ספקטרה, שמזכיר בעברית דווקא את צורת הנקבה. ריבוי "בנוסה עברי", לאמור – ספקטרומים, נראה כסלנג נחות.

גליליאו זה לחצר בצהרי יום שמש ואמדוד בעזרת מכשיר פיסיקלי כמה אור מוחזר מן הנייר הלבן וכמה אור מוחזר מאותיות הדפוס השחורות. אגלה, כמובן, כי מן האותיות מוחזר אחוז קטן ממה שמחזיר הנייר הבהיר. עתה אכנס פנימה לחדר ושוב אערוך את המדידות. ערכי הקריאה על המכשיר יהיו כמובן נמוכים הרבה יותר, אך עדיין האותיות השחורות מחזירות אותו אחוז קטן ביחס לנייר הלבן. וראו זה פלא: בשמש, האותיות השחורות מחזירות לעיני יותר אור ממה שמחזיר הנייר הלבן באפלולית החדר! ועדיין, האותיות נראות שחורות. מה שקובע איננו הכמות המוחלטת אלא היחס אל הרקע הכללי. וניסוי נוסף: נארגן כך שכל שדה הראיה שלנו יהיה חשוך למדי, לבד מריבוע קטן שמואר בעוצמה גבוהה יותר, ונראה צבעוני ועליו. עתה נגביר במידה ניכרת את עוצמת התאורה של כל שדה הראיה לבד מן הריבוע. והנה, לנגד עינינו ממש יהפוך הריבוע הצבעוני לשחור, למרות שעוצמת התאורה עליו לא השתנתה! למען האמת "ניסוי" די דומה נעשה בכל פעם שמופעל מקלט טלוויזיה. כשהמכשיר כבוי, הצג שלו נראה פעמים רבות אפור. והנה, עם הפעלת הטלוויזיה מופיעה על הצג גברת בשמלה שחורה הנוסעת בכרכרה שחורה כפחם. כיצד הפך חלק מן הצג האפור לשחור? והרי הפעלת המכשיר יכולה להגדיל את עוצמת האור המגיעה לעינינו מן הצג, בשום אופן לא להקטינה. מתברר כי הכתמים הבהירים שנוספו לצג (שערה הבלונדיני של הגברת האוחזת בכפפתה הצחורה קמליה בהירה וכלבלב לבן) הם שהפכו את האזורים האפורים לשחורים-משחור.

תחושת השחור מוגדרת, אם כן, לא רק על-פי מה שיש באזור השחור, אלא בה-במידה על-ידי מה שיש ברקע. כדאי לזכור זאת, מפני שהדבר נכון במידה רבה עבור כל הצבעים. למשל, נוכחנו כי אין שום תערובת של אורכי-גל הנתפשת כשלעצמה כבעלת צבע חום. אבל יש תערובות אורכי-גל שנראות חומות כשעוצמת התאורה שלהן נמוכה ביחס לרקע. אם נוריד את הבהירות של כתם צהוב (או כתום) ביחס לרקע, הוא ייראה לנו חום. ניתן להוריד את העוצמה על-ידי הוספת שחור; אכן חום = כתום + שחור. דרך אחרת להפוך כתום לחום היא הגדלת הבהירות של הרקע המקיף.

ראוי, אם כן, להבחין בין תחושת השחור לתחושות שאר הצבעים. הבחנה אחרת היא בין צבעים "ממש" לבין צבעים "נייטרליים", האפורים. גוף נראה צבעוני אם הרכב תערובת אורכי-גל שהוא מחזיר שונה מהתערובת הפוגעת בו (למשל – עקב בליעת אורכי גל מסוימים). הכלורופיל שבמלפפון בולע חלק מאורכי-גל הפוגעים בו ומחזיר לעינינו אורכי-גל אחרים, כתערובת המשרה בנו תחושה של ירוק. לעומת זאת, מגוף הנראה אפור מוחזרת תערובת אורכי-גל דומה בהרכבה לתערובת המקורית שפגעה בו. וזו סיבה



בקלות על הטורקיז, או להפך – להוסיף צהוב־ירוק, למשל. אדם בעל ראיית צבעים תקינה מבחין במיליוני גוונים ובני־גוונים!

### צבע של הפתעה

רבים מן הצבעים המופיעים לנו מחיי יומיום לא נמצאים בספקטרום אור השמש; לשווא תחפשו בו ארגמן (אדום־עמוק) או ורוד, וכמובן שלא תוכלו למצוא בו את הלבן המקורי, שלפני נפיצה. אותם צבעים המתגלים בספקטרום מכונים "צבעים ספקטראליים"; צבעים שאינם מופיעים בספקטרום – ארגמן, ורוד, לבן וחום, למשל – מכונים "צבעים לא־ספקטראליים", ונוכחנו כבר כי קיומם של אלה מנתץ כל ניסיון לזהות צבע עם אורך־גל. חשוב להדגיש: הטענה "לכל אורך־גל בתחום הנראה יש צבע אופייני לו" קצת מוגזמת, אבל הטענה ההפוכה היא שקרית לחלוטין: לא לכל צבע מתאים אורך־גל, כלל וכלל לא! במאמר מוסגר: אפשר אולי להשוות זאת במובן־מה לטעם מתוק: בעוד (שכמעט) כל הסוכרים המסיסים הם מתוקים, אין לזהות מתיקות עם סוכר מסיס, מפני שמלבד סוכרים מסיסים, חומרים נוספים רבים מאד, ומגוונים ביותר מבחינה כימית (מלחי עופרת ובריליום, סכרין,

שאורך־הגל שלה מעבר לערכים אלה, אלא שקרינה זו היא בלתי נראית עבורנו. הקרינה שאורך־הגל שלה קצר מן הסגול מכונה על־סגול (אולטרה־סגול, UV); זו שאורך־הגל שלה ארוך מן האדום היא תת־אדום (אינפ־האדום, IR). מניסוי הנפיצה של ניוטון עולות שתי שאלות השייכות לשני תחומים נפרדים לחלוטין: ראשית, מדוע מתרחשת נפיצה של אורכי־הגל השונים במנסרת זכוכית? – זוהי שאלה פיסיקלית, ואין לנו צורך לעסוק בה כאן. שאלה שניה – ושונה לחלוטין – היא, מדוע תערובת אורכי־הגל איננה נתפשת כתערובת (כהרבה צבעים ביחד, כעין סימפוזיה של צבעים) אלא כישות אחידה, השונה איכותית ממרכיבי התערובת?

נהוג לומר כי "לכל אורך־גל בספקטרום יש צבע משלו". ובכן לא בדיוק, יש בכך משום הגזמה, שהרי מדובר ברצף, ואיננו מסוגלים להבחין בשינויים דקים־שבדקים. מעבר לכך, מספר כינויי הצבעים הקיימים בשפה, בכל שפה אנושית, קטן בהרבה ממספר הגוונים שניתן להבחין ביניהם. בספקטרום אור השמש נהוג לזהות סגול, כחול, כחול־ירוק (טורקיז, ציאן), ירוק, צהוב, כתום ואדום (אדום שנוטה מעט אל הכתום). מופיעים כאן 7 שמות, אבל מספר זה הוא במידה רבה שרירותי, מסורתי־מאגי, שהרי ניתן לדלג

כדי שאזור מסוים  
בשדה הראיה  
ייראה כחול, לא די  
שיעורר יחס גבוה  
בין פעילות חרוטי  
הכחול לפעילות  
החרוטים לירוק  
ולאדום. אלא דרוש  
שיחס זה יהיה גבוה  
יותר מאשר  
בנקודות אחרות  
בשדה הראיה

אספרטיים, ציקלמט, חלבונים מסוימים ועוד), מעוררים תחושת מתיקות.

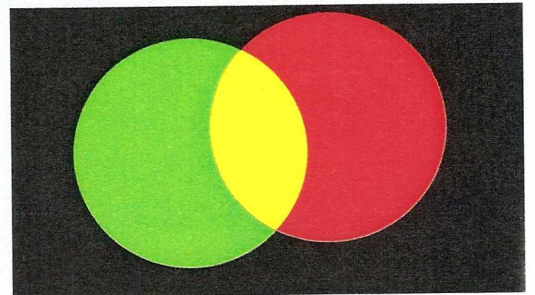
נוכל לערוך סיווג נוסף ולהבחין בין צבעים "רוויים", לצבעים בלתי-רוויים. צבעים בלתי-רוויים הם צבעי תערובות הכוללות לבן, כמו ורוד או ירקרק. מאחר שהלבן אינו ספקטרי, ברור שצבע בלתי-רווי הוא צבע לא-ספקטרי. ניוטון לא הסתפק בניסוי הנפיצה. הוא הניח מנסרה נוספת בדרכו של האור שעבר נפיצה וכך הצליח לערבב מחדש את הקרניים ולשוב ולקבל אור לבן. הטענה לפיה "הצבע של תערובת כל אורכי הגל הנראים הוא לבן" זכתה בכך לאישוש מרשים. ואולם לא רק תערובת זו נראית לנו לבנה, אלא תערובות-אור רבות אחרות, תערובות שיכולות לכלול רק 10 אורכי-גל מתוך הספקטרום, או רק חמישה, או רק שלושה אורכי גל שונים, ויש אפילו תערובות של שני אורכי-גל בלבד שצבען לבן! הדבר נראה מבלבל ומביך. בעזרת מראות ומנסרה בדק ניוטון גם מה קורה בערבוב שניים או שלושה אורכי-גל. התוצאות, חלקן נראות "מובנות וטבעיות". כך למשל מערבוב של אור ארוך-גל (הנראָה כשלעצמו אדום) עם אור בעל אורך-גל בינוני (הנראה כשלעצמו צהוב) מתקבל "כצפוי" אור כתום. כצפוי, מפני שכבר מניסיון ילדות למדנו שערבוב של צהוב עם אדום יוצר כתום. המרכאות מציינות שלא כך – בהחלט לא כך – מִבְּחִינָה פִּיסיקָלִית: עבור מכשיר פיסיקלי אין שום

נוספת: תערובת של אור אדום ואור ירוק נראית... צהובה! מי שמתקשה להאמין בכך מוזמן לערוך בעצמו ניסוי בעזרת שני מקורות אור, למשל – בעזרת שני מקרני שקופיות עם מסנני-צבע מתאימים. כיום אפשר להתאמץ פחות: בצגים של טלוויזיות ומחשבים פזורים אלמנטים הפולטים אור ירוק, וכאלה שפולטים אור אדום. די להפעיל את האלמנטים פולטי האדום יחד עם האלמנטים פולטי הירוק כדי להיווכח בתוצאה הצהובה. וזאת יש לדעת, בצגים אין אלמנטים הפולטים אור צהוב; כל שְׁמָלָה צהובה או לימון בשל הנראים בטלוויזיה מורכבים מאלמנטים אדומים וירוקים. ניתן להבחין בכך בהתבוננות מקרוב על הצג, ורצוי להיעזר בעדשה. אכן, אור אדום + אור ירוק = צהוב.

### שלושה צבעים ושלוש-מאות שנים

"המפץ הגדול" של חקר ראיית הצבעים – ניסוי הנפיצה – נערך כנראה בשנת 1666, כשנמלט ניוטון מקיימברידג' והסתגר בביתו מאימת מגפת הֶדְבֵר שהשתוללה (הוא עיכב פרסום מפורט של התוצאות והמסקנות עד תחילת המאה ה-18). בעקבותיו ערך את ניסויי הערבוב של אורות ספקטריים, וכבר נוכחנו כי רבים מניסויים אלה הניבו תוצאות "מוזרות", מביכות. רק בתחילת המאה ה-19 (1802) הוצע הסבר מקיף לתצפיות שהצטברו והלכו. היה זה תומס יאנג, הפיסיקאי, הרופא והאֶגְזִיפְטוֹלוֹג (יאנג תרם לפענוח אבן הַרוֹזֵטָה) האנגלי. הוא התרשם מן העובדה שתערובות מתאימות המורכבות בסך-הכל משלושה אורות צבעוניים תואמות שפע עצום של צבעים שונים, והסיק מכך שבעין קיימים שלושה סוגים שונים – שלושה בלבד – של "קולטני אור".

כמחצית המאה מאוחר יותר פיתח והרחיב הפיסיקאי והפיסילוג המהולל הָרְמָן פוֹן הֶלְמְהוֹלֶץ את התיאוריה של יאנג, וטען כי מדובר בשלושה סוגים שונים של תאי-חוש-לאור שברשתית העין, וְמֵאֵז מוֹפְרַת התיאוריה בשם "התיאוריה התלת-צבעית (טֵרִיכְרוֹמָטִית) של יאנג והלמהולץ". תוך שהוא מסתייע בשיטה רבת-השראה להשוואת בהירויות של צבעים שונים שפיתח הפיסיקאי הסקוטי ג'יימס קלרק מקסוול, העריך הלמהולץ את תחומי הבליעה של שלושת סוגי התאים הללו, שלושה סוגים שונים של חרוטים (מדוכים, cones). כמאה שנה נוספות עברו עד שפותחה שיטה מספיק עדינה (מיקרו־סֶקְטְרוֹפּוֹטוֹמֵטְרִיָה) שאֶפְשְׂרָה בדיקה ישירה של תאי חוש לאור. ברשתיות של חולייתנים שלהם ראיית צבעים מפותחת (דגים, קופים) זוהו, אמנם, שלושה סוגים שונים של חרוטים, שלכל אחד מהם עקום בליעת אור ("ספקטרום בליעה") אופייני לו. כעבור זמן מה נעשתה הבדיקה גם ברשתיות של בני-אדם. שלוש-מאות שנה לערך חלפו מאז ניסוי הנפיצה ועד שנמצאה הוכחה ישירה לתיאוריה הטריכרומטית.



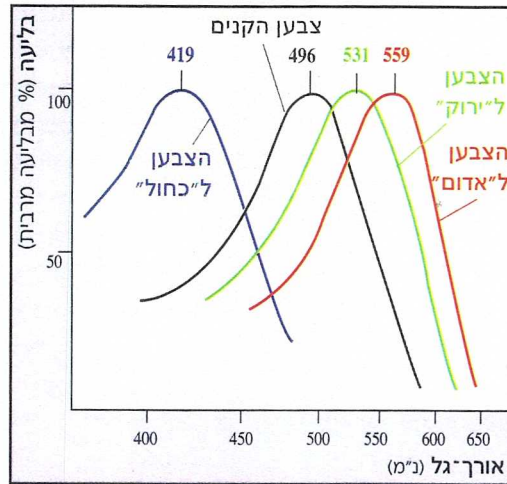
דמיון בין תערובת של שני אורכי-גל (ארוך + בינוני) לבין אורך-גל ספקטרי בודד הנראה כתום. אין שום דמיון! להפך, המכשיר, לו ידע לחשוב, היה חושב ודאי שאנחנו הזויים...

ואולם לא כל התוצאות היו כה "צפויים" כדוגמת הכתום. למשל, ערבול של אור ספקטרי כחול עם אור צהוב מתאים יצר אור... לבן. אכן, אור כחול + אור צהוב = אור לבן! משהו פה נראה מוזר, "לא הגיוני". הרי כל ילד יודע: כשמערבבים צבע כחול עם צבע צהוב מתקבל צבע ירוק, בפירוש לא לבן. בהמשך נצטרך להתמודד עם סתירה זו בין ממצאיו של ניוטון לבין ניסיונו האישי, אבל התוצאה המוזרה היתה בבחינת רמז לבאות: סיפור ראיית הצבעים הולך להיות סיפור מורכב ורבי-הפתעות! הנה הפתעה

אור אדום + אור ירוק = אור צהוב. את הניסוי הזה יש לערוך בעזרת מקורות אור – שני מקרנים או צג מחשב. כאן, על הנייר, מופיע שְׁחֹזֹר בלבד של הניסוי.



עקומי בליעת אור של שלושת סוגי החרוטים שברשתית עין האדם (וכן הספקטרום של הקנים). צבעי העקומים מתארים את תחושות הצבע שמעוררים החרוטים השונים (ולא את צבעם)



בנוסף לחרוטים שוכנים ברשתית העין תאי חוש לאור מסוג אחר, המכונים קנים. רגישותם לאור גבוהה יותר מזו של החרוטים, והם מאפשרים ראייה בעוצמות אור נמוכות מאד, "ראיית לילה". בתנאים אלה אנו יכולים להבחין בעצמים אך לא בצבעיהם.

התיאוריה התלת-צבעיית מסבירה את העובדה שעבור כל צבע נתון ניתן למצוא תערובת של שלושה אורות צבעוניים שיוצרת בנו תחושה זהה לחלוטין. שלושת האורות שמשמשים בהם אינם חייבים להיות שלושת "צבעי-היסוד" דווקא, ובלבד שיהיו 3 אורות מספיק נבדלים זה מזה. שלושת האורות המשמשים בבדיקה מסוימת מכונים "נוסחת הבדיקה". במהלך הבדיקה משנים את תרומתו של כל אחד משלושת האורות לתערובת – כלומר, את עוצמתו. הבדיקה נעשית כך: על מחציתו של מסך הקרנה (או צג) מקרינים אור כלשהו, שהתערובת צריכה להתאים לו, בעוד שהמחצית השנייה מוארת על ידי התערובת. עבור כל צבע נתון (צ"נ) ניתן לחבר עוצמה (ע) מתאימה של אור בצבע אחד (צ1) עם עוצמה מתאימה (ע2) של צבע שני (צ2) וכך לגבי השלישי, כך שתתקיים המשוואה:  $צ"נ = 1ע \times 1צ + 2ע \times 2צ + 3ע \times 3צ$ . משוואה כזו מכונה "משוואת תיאום צבעים". חיוני להזכיר כי משוואה זו מתקיימת בתחושתו של הנבדק, והיא במפורש איננה מתקיימת מבחינה פיסיקלית; עבור האדם לתערובת הצבעים יש איכות משלה – השווה לצבע הנתון, בעוד שעבור מכשיר פיסיקלי מדובר בתערובת, שכל אחד ממרכיביה שומר על אופיו העצמאי!

מסדרה ארוכה של בדיקות שורטט משטח הצבעים. זהו משטח המזכיר משולש שקצת מתחו ועיוותו אותו. על גבי הקו העקום המתחיל ב-400 ומסתיים ב-700 שוכנים כל הצבעים הספקטורליים. בסיס המשטח כולל את הארגמניים, הלא ספקטורליים, ואילו פנים המשטח מכיל צבעים בלתי

רוויים, ובמרכזו – הצבע "הכי בלתי רווי", הצבע הנייטרלי – לבן. חיבור בקו ישר של כל שתי נקודות בתוך המשטח או על הקו התוחם אותו מתאר את הצבע המתקבל מערבוב האורות הצבעוניים שמתאימים לנקודות. חיבור 400 עם 700 נותן ארגמן. חיבור אדום עם ירוק נותן צהוב (מעט בלתי רווי). חיבור כחול עם צהוב נותן – אכזר – לבן, וכך גם ירוק עם ארגמן.

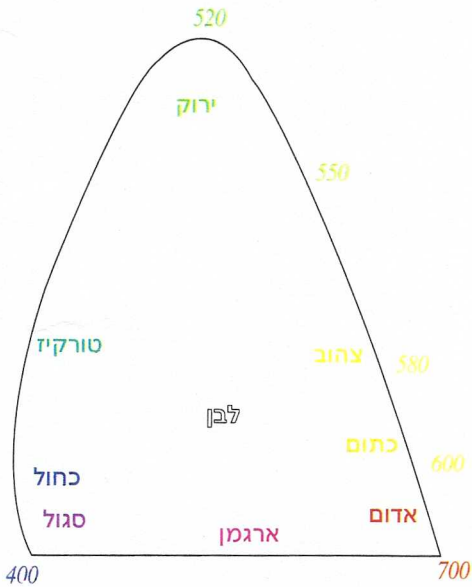
צבעים בעלי בהירות נמוכה יותר ימצאו במישור אחר, מתחת למישור זה; את החום נמצא מתחת לאזור הצהוב-כתום, את האפורים נמצא מתחת ללבן, ועמוק-עמוק למטה שוכן השחור.

הנס אירטל (Irtel), מאוניברסיטת מנהיים, הציב ברשת אתר גדול של ניסויים בתחום הראיה. האתר כולל גם סדרת ניסויים בתחום ראיית צבעים. מי שחפץ בכך יכול להוריד (לאמור, למשוך למחשבו) סדרת ניסויים זו, ולערוך ניסויים

במו עיניו. הכתובת היא:

<http://www.uni-mannheim.de/fakul/psycho/irtel/cvd/CVD.ZIP>

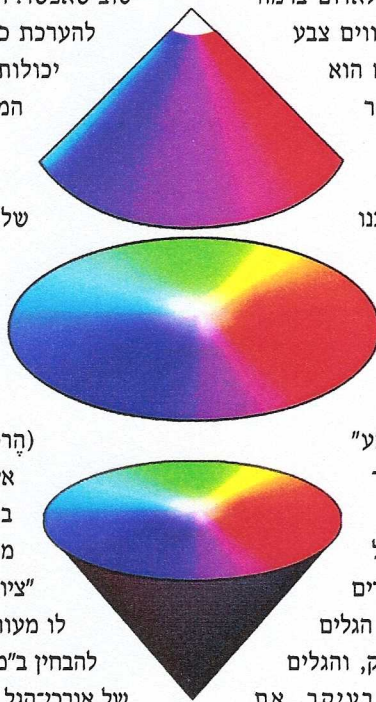
מתוך סדרת הניסויים<sup>3</sup>, הניסוי הנוגע במיוחד לענייננו, ומרשים מאד, הוא הניסוי 3 Color Mixer.



3. יורד קובץ מכוון (zip) אותו יש לפרוש. בפרישה מופיעים קבצים אחדים, ביניהם קובץ ביצוע הניסויים = קובץ ההפעלה Cvd.exe, וכן קובץ סיוע README. במקרה שקובץ ההפעלה אינו פועל יש לנהוג לפי ההוראות שבקובץ README (ניתן לפתוחו בעזרת מעבד תמלילים), אבל כדאי גם לנסות למחוק את 3 השרות והאחרונות בקובץ Cvd.x, אותו ניתן לפתוח בכל מעבד תמלילים.

משטח הצבעים. מערבוב כחול, ירוק ואדום נגיע למרכז המשטח, ללבן. מחיבור כחול מתאים עם צהוב נגיע ללבן. מחיבור לבן עם ירוק ספקטורלי נקבל ירוק בלתי-רווי, ירקרק

מהו הקשר שבין שלושה סוגי חרוטים לבין תחושת צבע? מתברר כי הצבע שנראה לנו בכל נקודה בשדה הראיה הוא ביטוי ליחס בין פעילות שלושת סוגי החרוטים באזור המתאים ברשתית-העין. אם, נאמר, אור מסוים מפעיל את החרוטים-לכחול ברמה של 38 יחידות, את החרוטים-לירוק ברמה של 82 יחידות ואת החרוטים-לאדום ברמה של 61 יחידות, וכתוצאה מכך אנו חווים צבע מסוים, הרי שכל אור אחר – בין אם הוא אורך-גל בודד, תערובת של מספר אורכי-גל בדידים, או רצף הכולל אורכי-גל רבים מאד – שישרה יחס הפעלה של 38:82:61, כל אור כזה יעורר בנו תחושת אותו צבע בדיוק; בשום אופן לא נוכל להבחין בהבדלי גוון כלשהם בין הרכבי האורות השונים, הם ייראו זהים לחלוטין, צבעים תואמים. קיומם של צבעים תואמים (מִטְמָרִים) מפיק את המושג "צבע" מתחום הפיסיקה לטובת הנירובולוגיה-פסיכולוגיה.



אור השמש כולל כזכור את כל אורכי-גל בתחום הנראה; הגלים הקצרים מעוררים בעיקר את החרוטים-לכחול, הגלים הבינוניים בעיקר את החרוטים-לירוק, והגלים הארוכים נבלעים ומפעילים בעיקר את החרוטים-לאדום. אם במקום אור השמש נאיר בשלושה אורכי-גל בדידים מתאימים – קצר, בינוני וארוך – יופעלו החרוטים בדיוק באותו יחס, והתחושה תהיה זהה לזו שמעורר אור השמש: תערובת שלושת אורכי-גל תואמת, אם כן, את אור השמש הרציף. כפי שנזכרנו, מהתבוננות במשטח הצבעים נוכל להבחין כי הקו המחבר אור צהוב-כתום ספקטרי עם כחול מתאים עובר דרך הלבן. שני האורות הם בעלי צבעים מנוגדים – הם מבטלים זה את צבעו של זה, והתוצאה היא הלבן הנייטרלי. מסיבה זו הם נקראים גם "צבעים משלימים" – הם משלימים זה את זה ללבן. האור הכחול יפעיל את החרוטים לכחול ומעט את החרוטים לירוק, והאור הצהוב-כתום יפעיל את החרוטים לאדום וכן יתרונם לפעולת החרוטים לירוק. ואכן, זוג צבעים מנוגדים-משלימים אלה מעוררים פעילות חרוטים זהה לזו שמעורר אור הלבן, והתערובת שלהם תואמת את אור השמש. אין שום מערכת פיסיקלית שפועלת כך (אלא אם כן תוכננה במתכוון לחקות את מערכת הראיה האנושית), וגם תהליכים ביולוגיים רבים אינם פועלים כך. עוצמת הפוטוסינתיזה בצמחים תהיה שונה לחלוטין באור לבן הכולל את כל הספקטרום

לעומת תאורה לבנה הכוללת בסך-הכל זוג אורות מנוגדים-משלימים.

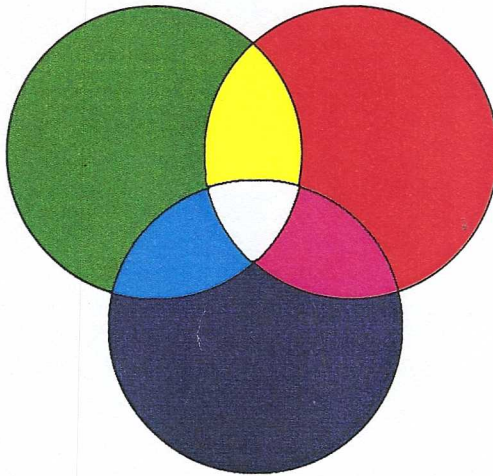
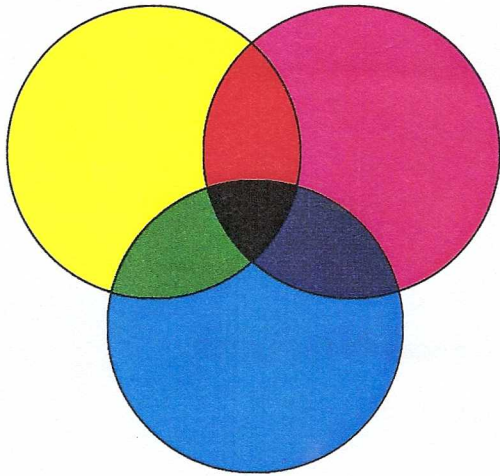
מדוע נוהגת כך מערכת הראיה? מהו היתרון הביולוגי-אבולוציוני ביצירת זהות בין דברים שהם, למעשה, שונים לחלוטין? והרי מערכת הראיה אמורה לספק לנו מידע על העולם והרכבו, לא להטעות אותנו? ובכן, זה כנראה הכי טוב שאפשר. דוגמה קטנה: נניח שמישהו פיתח מבחן להערכת כישוריהם של אנשים. במבחן נבדקות יכולות שונות – לשונית, מתמטית ועוד. המבחן בנוי כך שכל התשובות נלקחות בחשבון והתוצאה הסופית היא מספר כלשהו, נאמר בין 0 ל-100. ייתכן מאד שלשני נבדקים אותו ציון אך כישוריהם שונים מאד – זה חזק בצד הלשוני וחלש במתמטי, ולהפך. מי שמחפש עובד למשרה הדורשת כישורים לשוניים דווקא לא ידע לבחור בין השניים. היה רצוי שיקבל מידע נוסף (הֶרֶכֶב הַצִּיּוֹן, ראינו עם המועמד), אך אם אין אפשרות לקבל מידע נוסף, עדיף לקבל בעל ציון גבוה מאשר בעל ציון נמוך. מערכת ראיית הצבעים גם היא מקצה "ציון" אחד בלבד – יחס ההפעלה, ובהתאם לו מעוררת בנו תחושת צבע מוגדר. רצוי היה להבחין ב"מרכיבי הציון", כלומר – בהרכב המדויק של אורכי-גל, אלא שזו משימה בלתי אפשרית: לשם כך צריך היה לצופף בכל נקודה ונקודה ברשתית-העין מספר גדול מאד של יחידות קליטה, לשכל אחת תחום צר של אורכי-גל שהיא קולטת. הדבר פשוט אינו אפשרי מסיבות גיאומטריות-ביולוגיות – אין מקום. אם כן, אין לנו דיווח מלא על הרכב החומרים בעולם; האם זה צבע דפוס ירוק או כלורופיל, מיץ העגבניות המסורת של מערבוני הספגטי או דם? אבל אנו יכולים, כאמור, להבחין במיליוני גוונים שונים, כך שמערכת הראיה שלנו – שאיננה מבצעת אנליזה מדויקת של אורכי-גל – מבצעת פשרה אבולוציונית יעילה למדי, המכונה ראיית צבעים. צבע הוא, אם כן, ביטוי ליחס הפעלה של תאי חוש לאור.

החרוטים מופעלים על-ידי אורות צבעוניים; אך מי עורך השוואה בין רמות הפעילות שלהם? מתברר שאלה הם תאי עצב לאורך מסלול הראיה, המקבלים מידע מהחרוטים. לפיכך, אם נצליח בדרך כלשהי לעורר תגובה בתאי העצב שמזהים יחס פעילות חרוטים, הרי שהמוח יקבל מהם דיווח על צבע, גם אם לא היה כלל אור צבעוני. דיווח זה יפעיל במוח אותה פעילות המשרה בנו תחושת צבע. אם, למשל, למסלולים העצביים יש רגישות שונה לתדירות של חילופי אור-חושך, הרי שבעזרת חילופי שחור-לבן בקצב

**לשווא תחפשו**  
**תערובת אורכי-גל**  
**שצבעה כצבע**  
**אדמת פרדס**  
**דשנה, חומה. אין**



אם נשרטט את משטח הצבעים כעיגול שבהקפו הצבעים הרוויים ובניצב לו ממד הבהירות, יתקבל חרוט כפול, שבחוד התחתון שלו מונח השחור ובחודו העליון – הלבן



ירוק, צהוב, כתום) יוצר תחושת צהוב. תערובת שני הצבענים תבלע את כל אורכי-הגל מלבד תחום צר של ירוק. ערבוב של פיגמנטים הוא לפיכך ערבוב מחסר – הוא מחסר יותר אורכי-גל מן האור הלבן מאשר כל אחד מן הרכיבים. ובכן, בערבוב אורות א' ו'ב', ערבוב מחסר, נעשית הפעולה: אור א + אור ב. לעומת זאת, בערבוב צבענים ג' ו'ד' נגרע עוד אור מתוך הלבן: לבן פחות הסכום (בליעת ג + בליעת ד).

נדמה אולי שאחרי הסבר זה של הלמהולץ סולקו המכשולים מחקר ראיית הצבעים. האמנם? ובכן, ניווכח שלא בדיוק. בדרך מצפופת עוד שתי הפתעות, זו של הרינג בסוף המאה ה-19 וזו של לאנד באמצע המאה העשרים.

### ...ומחסור

המושג "עֵרוֹן צבעים" מוכר מאד, אך רוב "עיוורי הצבעים" מבחינים בצבעים אלא שבמגוון מועט ביותר. מדובר באנשים (רוב־רובם גברים) שכתוצאה מפגם גנטי יש להם שני סוגים שונים של חרוטים, לא שלושה. כל משטח הצבעים מצטמצם בהם לקו ישר אחד. עֵרוֹן צבעים מוחלט נובע מקיום סוג אחד בלבד של חרוטים, או מחוסר מוחלט של חרוטים (וראו "לקריאה נוספת": "האי של עיוורי הצבעים") – משטח הצבעים מצטמק עבורם לנקודה בודדת; תוך שינויי עוצמה בלבד עיוור צבעים מוחלט יכול לתאום כל צבע שהוא בעזרת כל אורך גל בודד. מעניין כי אנשים שמלידתם לא חשו בצבע כלשהו יכולים לחוות משהו מתחושת הצבעים כצבעי פכנר, תוך סיבוב מתאים של סביבון בנהאם.

בתאורה עמומה ביותר החרוטים אינם מופעלים, כך שבתנאי "ראיית לילה" פועלים רק הקנים וכולנו למעשה

מתאים נוכל להשרות רמות שונות של פעילות בתאים המשווים, וכך להשרות תחושת צבע למרות שהגירוי כלל אך ורק שחור ולבן, כבסביבון בנהאם.

### חידה בחיבור וחיסור...

תרומתו של פון־הלמהולץ למדע הצטיינה בספקטרום מדהים של הֶשָׁגים. לתחום הספציפי של ראיית צבעים הוא תרם לא רק את פיתוחה וביסוסה של התיאוריה התלת־צבעית, אלא גם הסבר לאחד המעקשים שהיקשו על ההתקדמות בפיענוח תהליכי ראיית הצבעים. הכוונה היא לסתירה בין הניסיון הבסיסי, היומיומי, של כל אחד מאתנו בערבוב צבעים לבין התוצאות שקיבלו ניוטון, יאנג, מקסוול ופון־הלמהולץ. מדוע כשמערבבים כחול עם צהוב מקבלים ירוק (ולא לבן), אדום עם ירוק הוסיף מלוכלך (ולא צהוב חי ובהיר), וערבוב אדום, כחול וירוק יוצר עיסה כהה, כמעט שחורה (ולא לבנה)? הלמהולץ הציע פתרון. ערבוב של אורות הוא חיבור של אורות; אם תקרין על מסך אור כחול ותוסיף, בעזרת מקרן שני, אור צהוב, מובן שהתוצאה תהיה אור שעוצמתו גבוהה יותר מכל אחד בנפרד; כך בדיוק גם אם תפעיל על־גבי צג את האלמנטים האדומים והירוקים (שיוצרים יחדיו תחושת צהוב) יחד עם האלמנטים הכחולים – התוצאה תהיה כתם לבן על־גבי הצג. לעומת זאת, בחיי היומיום איננו מערבבים אורות אלא צבענים, פיגמנטים. צבענים אינם פולטים אור כי אם להפך – הם בולעים אור. צבען הנראה לעינינו כחול הוא חומר שבולע, ולפיכך גורע, מאור השמש, את אורכי-הגל היותר ארוכים (אדום, כתום, צהוב), כך שתערובת אורכי-הגל שחוזרת ממנו לעינינו (סגול, כחול, ירוק) תואמת לכחול. צבען צהוב בולע אורכי-גל קצרים (סגול וכחול) וכן את אורכי הגל היותר ארוכים (אדום), ומה שמוחזר ממנו

ערבוב אורות מחסר (מימין): האורות מוקרנים ממקרנים, או מחומרים זוהרים המרוחים על צג (כאן, על־גבי הנייר, זה רק לשחזור מצולם). ערבוב צבענים מחסר (משמאל): אור שמש (או מנורה) פוגע בנייר. במקום החפיפה של שלושת הצבענים נבלעים אורכי-הגל הארוכים (על ידי הצבען הכחול, וגם הצהוב), הבינוניים (על ידי הצבען הכחול והצבען האדום) ואורכי-הגל הקצרים (על־ידי הצבען האדום והצבען הצהוב). כך שמאזור זה לא מגיע אור והוא נראה שחור

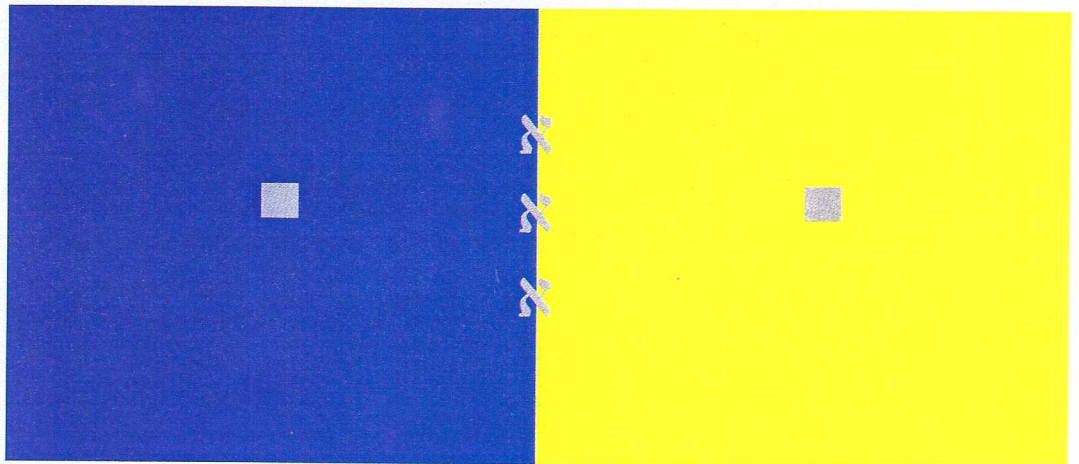
"עוורי צבעים". בהקף הרשתית מרובים הקנים ומועטים מאד החרוטים, כך שבהקף שדה הראיה ראיית הצבעים דלה בנו מאד.

בנוסף לפגמים תורשתיים ברשתית, עוורון צבעים נגרם לעתים רחוקות כתוצאה מזיהום או מהרעלה (למשל – בכספית) של הרשתית. אכרומטופסיה – עוורון צבעים מוחלט – יכולה להיגרם גם כתוצאה מפגיעה באזורי הראיה של קליפת המוח הגדול; זוהי "אכרומטופסיה קליפתית".

### צבעים נוגדים ותיאוריות צהובות

עם ביסוס התיאוריה הטריכרומטית באמצע המאה ה-19 נדמה היה שראיית הצבעים זכתה לשקט אינטלקטואלי. אבל לא חלפו שנים רבות עד שהפיסיוולוג והפסיכולוג הגרמני אוולד הרינג קרא תיגר על יאנג-הלמהולץ. "איזה תלת-צבעית? מה תלת-צבעית?!" זעק הרינג (למעשה הוא ביטא זאת בגרמנית שקטה, כבדתי-ראש ומנומסת). קריאת התיגר שלו התבססה, בין השאר, על צבעי הגרר השליליים שכבר נוכחנו בהם, וכן על תופעת הצבעים הנוגדים: אם לוקחים ריבוע אפור ומקיפים אותו ברקע אדום, הריבוע האפור מקבל גוון ירקרק; אותו ריבוע עצמו אם יוקף ברקע ירוק יצטבע אדמדם. אם נחליף את הרקע לכחול, ייראה

לדור יחד כטורקיז. אדום וכחול יוצרים תערובת שְׁבֵה כל אחד מוסיף לבוא לידי ביטוי כסגול-ארגמן. אבל אין ירוק-אדמדם (או: אדום-ירקרק), ואין כחול-צהבהב (או צהוב-כחלחל). כלומר, הצבעים הנוגדים אינם יכולים "לשתף פעולה". הם כאילו מבטלים, או מקזזים, זה את זה. תופעות אלו הניעו את הרינג להציע את תיאוריית הצבעים הנוגדים: ירוק ואדום הם נוגדים, כחול וצהוב נוגדים. הכוונה היא כי התהליך הפיסיולוגי שפועל כתגובה לירוק הוא הפוך מזה הפועל בתגובה לאדום: אם ירוק משך "פלוס" אזי אדום גורם "מינוס"; אם ירוק מעלה, אדום מוריד. לפיכך אין הם יכולים להתבטא יחדיו, אלא לבטל זה את זה. שנים רבות נחשבו שתי התיאוריות – התלת-צבעית והצבעים הנוגדים – לתיאוריות נוגדות, שאינן יכולות להתקיים בכפיפה אחת. בקרב החוקרים התגבשו שתי אסכולות צהובות זו לזו – חסידי יאנג-הלמהולץ (ומתנגדי הרינג) וחסידי הרינג (ומתעבי יאנג-הלמהולץ); האסכולות צהובות זו לזו לא רק כאות לשנאה הדדית, אלא גם כי השניה כוללת צהוב, שאיננו מוזכר בראשונה. לכאורה, עם הבדיקה הישירה של החרוטים בשיטת המיקרו-ספקטרו-פוטומטריה וזיהוי שלוש האוכלוסיות הנבדלות של החרוטים הוכרע הקרב. אלא זאת: שנים מספר קודם לכן נמצאו הוכחות ישירות



הריבוע בגוון צהוב חיוור, וכשיוחלף הרקע לצהוב, יכחיל הריבוע. אולי ניתן להסביר זאת כדוגמה לעכבה צדית: תאי עצב פעילים מעכבים את פעילות תאי העצב שלצידם: התאים המגיבים לכחול שברקע מדכאים את פעילות התאים לכחול המכוונים אל הריבוע האפור; מן האפור נגרע לכן המרכיב הכחול, והתוצאה היא גוון צהבהב. ועובדה נוספת שהרשימה את הרינג: צהוב וירוק יכולים לדור "בכפיפה אחת" כצהוב-ירקרק. ירוק וכחול יכולים

לתיאוריית... הצבעים הנוגדים! בבדיקת הפעילות החשמלית של תאי העצב האופקיים שברשתית – תאי עצב המנקזים מידע מהחרוטים – זוהו תאים שפעילותם החשמלית בתגובה לאור צהוב הפוכה מן הפעילות שמשך בהם אור כחול; תאים אלה אדישים להקרנה של אור כחול+צהוב יחד (לאמור: אינם מגיבים לאור לבן). כדאי להדגיש: בליעת האור עצמה נעשית בחרוטים, והחרוטים משפיעים דרך צמתים עצביים (סינפסות) על תאי העצב האופקיים



אור כחול + אור

צהוב = אור לבן!

משהו פה נראה

מוזר, "לא הגיוני".

הרי כל ילד יודע:

כשמערבבים צבע

כחול עם צבע

צהוב מתקבל צבע

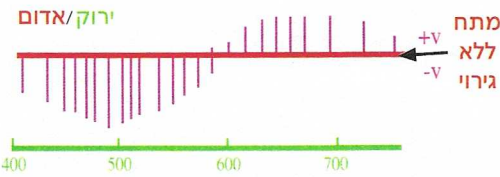
ירוק, בפירוש לא

לבן



הריבוע שמימין הוא העתק הריבוע השמאלי. אך הימני נוטה להיראות כחלחל חיוור, בעוד השמאלי – מעט צהבהב (לחיזוק האפקט כדאי לשים חץ מקו הגבול שבין הצבעים, לאורך אא, ועד לאף)

תאי עצב אופקיים ברשתית של דג זהב. למעלה – תא שהמתח החשמלי שלו נעשה שלילי יותר בתגובה לאור אדום, וחיובי יותר בתגובה לירוק



שברשתית. ברשתית נמצאו גם תאי עצב אופקיים שתגובתם לירוק הפוכה מתגובתם לאדום, בדיוק כפי שציפה הרינג. מאוחר יותר נתגלו תאי עצב רבים נוספים במסלולי הראיה שאופיינית להם תגובה הפוכה לזוגות הצבעים של הרינג. ובכן, שתי תיאוריות שלשתיהן נמצאו הוכחות ישירות, כך שאין הן יכולות להתנגש, אלא דווקא להשלים זו את זו. אכן, ההתנהגות התלת-צבעית מאפיינת את תאי החוש לאור, החרוטים, בעוד שמנגנון הצבעים הנוגדים פועל בתאי העצב המקבלים – במישרין ובעקיפין – מידע מן החרוטים. פשרה יפה וצבעונית.

מעניין כי מצלמת טלוויזיה עובדת בשלושה מסלולי צבע (המחקים את אלה של האדם), ואחר, לצורך השידור, נעשה תרגום של המידע למערכת של תהליכים נוגדים, כבמסלול הראיה.

### מסע צבעי אל המוח

רשתית-העין היא מבנה דקיק העשוי מספר שכבות של תאי עצב שיש ביניהם קשרים של עיבוד מידע והעברתו. תאי הרשתית השולחים, בסופו של דבר, מידע מעובד למוח מכונים בשם המוזר-למדי "תאי גנגליון". ביונקים, התחנה המרכזית המוחית הראשונה למידע חזותי (ויזואלי) מכונה "גוף הכפיפה", LGN, שהוא חלק ממוח הביניים. מתחנה (מסתורית למדי, תפקודה טרם פוענח) זו עובר המידע לקליפת המוח הגדול (הקורטקס), לאזור החזותי הראשוני (visual-1, V1) השוכן באיגרת העורף. התכונות החזותיות השונות של העצמים (צורה, תנועה, עומק, צבע) מטופלות במסלולים שהם נפרדים במידה רבה. עובדה זו כה מנוגדת לתפישה האינטואיטיבית שלנו (אני רואה אוטובוס אדום, גדול שנע מימין לשמאל כישות אחת) עד שהייתי מעז לכנות אותה, באנלוגיה לניסוי ניוטון, "נפיצת המידע החזותי".

תאי העצב שב-LGN שולחים מידע לאורך סיבויני העצב (אֶפְסוֹנוֹנִים) שלהם אל קליפת המוח החזותית הראשונית, V1. ב-V1 מרובים תאי העצב המגיבים לגירוי אור בצורת קווים, ותאים אלה מסודרים בכעין עמודות. בין העמודות זוהו בקופים מעין בוועיות, שהתאים המאכלסים אותן מגלים העדפה לגירויי צבע, וביניהם תאי עצב המגיבים באופן הפוך לירוק ולאדום, ותאי עצב המגיבים הפוך לכחול ולצהוב.

קליפת המוח החזותית השניונית, V2, שוכנת בסמוך לראשונית; תאי העצב השוכנים ב-V1 מעבירים אליה מידע חזותי. ב-V2 ניתן להבחין ברצועות רחבות וצרות, וביניהן אזורים חיוורים. התאים השוכנים ברצועות הרחבות עוסקים בתנועת עצמים בשדה הראיה; תאים השוכנים באזורים החיוורים שבין הרצועות מעבדים נתונים אודות פרטי הצורות; ואילו את הרצועות הצרות מאכלסים תאי

עצב העוסקים בצבעים. תאים אלה מעבירים מידע לאורך סיבויני-העצב (האֶפְסוֹנוֹנִים) שלהם אל קליפת המוח החזותית הרביעונית, V4, שהיא עשירה במיוחד בתאים המגיבים לצבעים. אזור מוחי זה זכה לפרסום רב בהקשר לראיית צבעים בעקבות מחקריו של סָמִיר זֶקִי (Zeki). זקי טוען בלהט כי בעוד שבתחנות הראיה המוחיות V1 ו-V2 התאים מגיבים לתחלוקת אורכי-הגל, הרי שתאי V4 מגיבים לצבע כפי שהוא נתפש בתחושתנו. מלכתחילה עמד זקי על חשיבות V4 כתחנת צבע מרכזית בקופים, אך עם פיתוח הטכניקה הלא-פולשנית של איתור אזורים פעילים במוח בעזרת פוזיטרונים (PET) מצא לטענתו פעילות באזור המקביל במוחו של אדם המתבונן בתמונה צבעונית. יש חוקרים הטוענים כי תאי העצב שב-V4 קשורים פחות לזיהוי הצבע ויותר לתופעת קביעות הצבע, שנתאר בהמשך. תאי V4 מוסרים מידע לחלק התחתון של אונות הצדע (= אונות הרקה), אזור שגם בו תאים רבים המגיבים רק לצבע מסוים. ואף זאת: אם מראים לקוף צבע כלשהו ועליו להשוות צבע זה לצבע שיופיע זמן-מה לאחר מכן, יש תאי עצב בחלק התחתון של אונות הצדע הממשיכים לפעול כל זמן הציפיה לצבע השני!

פגיעות מסוימות בקליפת המוח החזותית עלולות לגרום לפגיעה בראיית הצבעים, עד כדי עוררון צבעים מוחלט, המכונה "אכרומטופסיה קליפתית" (=שנגרמת מפגיעה בקליפת המוח הגדול). אכרומטופסיה קליפתית יכולה לפגוע גם ביכולת להיזכר בצבעים, להעלותם בדמיון, לחוות אותם בחלום או כצבעי אשליה.

### רעידת Land: הצבע בקבע

קשה לתאר את אדווין לאנד כמי שלא התמצא בצילום – הוא שהמציא את ה"צילום בן-רגע" וייסד את תאגיד פולרוואיד. הטרידה אותו השאלה מדוע כה קשה לקבל תמונות צבעוניות מהימנות בתנאי תאורה שונים, בעוד שאדם רואה את הצבעים בתנאי תאורה מאד שונים –

### מערכת הראיה

### שלנו איננה

### עורכת אנליזה

### מדויקת של

### אורכי-גל, אלא

### מבצעת פשרה

### אבולוציונית

### יעילה למדי,

### המכונה ראיית

### צבעים

צבע הוא תחושה  
 סובייקטיבית  
 הנוצרת בנו  
 בעקבות פעילות  
 מוחית ספציפית,  
 פעילות מוחית  
 שנגרמת בעקבות  
 השוואת יחס  
 פעילות שלושת  
 סוגי החרוטים בכל  
 נקודה ליחס זה  
 באזורים אחרים  
 בשדה הראיה

מערכת הראיה? ניזכר בגיליון גלילאו, שאותיותיו נראות שחור על גבי לבן הן באור השמש והן באפלולית החדר. גם בצבע צריך מנגנון שישווה את הרכב האור המגיע לעינינו מכל נקודה לאור הכללי שבשדה הראיה. כדי שאזור מסוים בשדה הראיה ייראה לנו כחול, למשל, לא די שהוא יעורר יחס גבוה בין פעילות חרוטי הכחול לפעילות החרוטים לירוק ולאדום. אלא דרוש שיחס זה יהיה גבוה יותר מאשר בנקודות אחרות בשדה הראיה.

נניח שנקודה מסוימת בשדה הראיה משרה יחס הפעלה כחול: ירוק: אדום = 53 : 81 : 29. לכאורה הצבע "השליטי" בנקודה זו אמור להיות ירוק. ואולם אם בשדה הראיה אין נקודות שבהן יחס ההפעלה של הכחול גבוה יותר, נקודה זו תיראה לנו כחולה! מערכת הראיה כאילו אומרת לעצמה כך: "בכל שדה הראיה כולו החרוטים לכחול מופעלים במידה לא גדולה. כנראה שהאור המאיר את שדה הראיה מכיל מעט אורכי-גל קצרים. אותי לא מעניין האור, אלא מיהם העצמים שסביבי. לפיכך אתחכם, לא אצפה שחרוטי הכחול יהיו פעילים יותר מן החרוטים האחרים, אלא אותה נקודה שבה החרוטים לכחול הם, יחסית לשדה הראיה, הפעילים ביותר, לנקודה זו אקנה את הציון כחול". לאנד הציע מודל שקרא לו "רטינקס" (רטינה + קורטקס, לאמור: רשתית + קליפת-מוח) לתאור וחישוב השוואת יחס ההפעלה בכל נקודה לנקודות אחרות בשדה הראיה. עד כמה דומה המנגנון העצבי במערכת הראיה שלנו למודל הרטינקס של לאנד? עדיין לא ברור.

מכל מקום, ניתן לומר שצבע הוא תחושה סובייקטיבית הנוצרת בנו בעקבות פעילות מוחית ספציפית, פעילות מוחית שנגרמת בעקבות השוואת יחס פעילות שלושת סוגי החרוטים בכל נקודה ליחס זה באזורים אחרים בשדה הראיה.

והיכן מצטרף הצבע לשאר תכונותיו של העצם? היכן וכיצד מצטרף הכתום (שהוא כתום בתנאי תאורה שונים) לברק, לכדוריות ולחספוס היוצרים יחד את מראה התפוז? למעלה מ-300 שנה, ותרומות של מאורות מדע כמו ניוטון, יאנג, מקסוול, פון-הלמהולץ ואחרים נדרשו כדי לנסח את התיאור הבלתי-שלם שהבאנו ולהציב סביבו את השאלות הפתוחות, ואלו השרויות עדיין באפלולית וטרם נוסחו כראוי.



**לקריאה נוספת:**

Gegenfurtner & Sharpe (Eds) "Color Vision: From Genes to Perception" (Cambridge, 2000)

אוליבר סאקס – "אנתרופולוג על המאדים" (מחברות לספרות, 1996), הפרק "פרשת הצייר עיוור הצבעים".  
 אוליבר סאקס – "האי של עיוורי הצבעים" (מחברות לספרות, 1998).

באור השמש (רצף כל אורכי-הגל הנראים), באור מנורת להט (העשיר בקצה האדום של הספקטרום), ובאור נורת פלואורסצנט (העשיר באורכי-גל קצרים, כחול-סגול), ורק לעתים חל בהם שינוי קל. לאנד ערך ניסויים רבים שנועדו לעמוד על שורש ההבדל שבין מערכת הראיה לבין סרט הצילום במצלמה. באחד הניסויים תלה תמונה מופשטת (ללא שום עצם מזהה שניתן לקשור אותו אסוציאטיבית לצבע, כמו התפוז הכתום שעדיין ממתין לנו בסלסילה) והאיר אותה בשלושה מקרנים, אחד בתחום צד של אורכי-גל קצרים (כחול), שני באורכי-גל בינוניים (ירוק) ושלישי – באדום. מובן שבתאורה כזו מתגלים כל הצבעים כולם, שהרי כל מיליוני הגוונים נובעים מיחסי הפעלה של שלושה סוגים של חרוטים. "מה יקרה", הבזיקה במוחו של לאנד השאלה, "אם אקטין מאד את עוצמת התאורה של אחד המקרנים?" תהה ועשה. הוא צמצם מאד את עוצמת הכחול. החדר הוצף בתערובת אדום + ירוק, כלומר באור צהוב. לכאורה, כל אזורי התמונה ייראו בגווני צהוב שונים. אך למרבה הפלא כתמי הצבע של התמונה שמרו על מגוון הצבעים המקורי! עתה בחן בעזרת מד-אור אזור בתמונה הנראה כחלחל. פוגעת בו תערובת עשירה באדום ובירוק, ורק מעט מאד כחול. כלומר פוגעת בו – ולפיכך גם מוחזרת לעינינו – תערובת אורכי-גל שצבעה אמור להיות צהוב-לא-רדוי (מעט הכחול שבתערובת משלים מעט מהצהוב ללבן). שוו בנפשכם: מאזור מסוים מגיע אור צהבהב אבל התחושה היא שרואים כתם צבע כחלחל!

לאנד ערך ניסויים רבים מסוג זה, בתמונות ובאורות שונים, ותמיד נראו התמונות בשלל הצבעים המקורי. הממצאים גרמו טלטלה עזה בקרב המומחים; אחד מהם אף הגדיל לעשות ופרסם מאמר סקירה שהוכתר בצמד המילים שבישר (בתרגום אנגלי) את גילויי של העולם החדש, גילוי אמריקה: Land! Land!. רעידת אדמה, מהפכה שלישית בהיסטוריה הארוכה של חקר ראיית הצבעים. למען האמת, ההתרגשות היתה קצת מוגזמת. שהרי תואר כאן המובן מאליו: אנו מבחינים היטב בכתום התפוז, בצבעם הירוק של העלים ובלובן הפרחים באור הבוקר האדמדם, בצהרי יום בהיר, באפלולית הירקרה שתחת עלוות הפרדס ובאפרוריותו של יום ערפילי, כלומר כשהרכב אורכי הגל של האור משתנה מאד.

מכל מקום, לאנד ניסח את עקרון "קביעות הצבע": העצמים שומרים במידה רבה על צבעיהם בתנאי תאורה הנבדלים באופן ניכר מבחינת הרכב אורכי-הגל. קשה להגזים בחשיבותו הביולוגית-תפקודית של עקרון קביעות הצבע: השאלה החשובה לחיינו איננה איזו עוצמה מגיעה לעינינו באורכי-הגל השונים, אלא מה טיבם של העצמים שלפנינו: פרי ירוק או בשל? נחש ארסי או תמים? הרכב האור הוא שולי בחשיבותו ואת השפעתו יש לנטרל. כיצד עושה זאת