

משפט הצבעים

מדוע אורכי הגל הקצרים ביותר של האור הנראה נראים לנו קרובים בצבעם (סגול) לאורכי הגל הארוכים ביותר שאנו רואים (אדום)? האומנם, הלבן כולל את כל הצבעים? ומדוע בספרי פיזיקה מופיע חומר הקשור בכלל לחקר המוח ומערכת העצבים? הצבעים עומדים כאן למשפט

תחושה מוזרה מעט להקדיש פרק בספר פיזיקה בסיסי לצבעים (שכאמור, אינם בבחינת יש פיזיקלי), עד שהם טרוח לגבות עצמם בציטוט מדבריו של הפיזיקאי הנודע הלורד קלווין "אם יש בידינו למדוד את המושגים בהם אנו דנים ולבטאם במספרים, הרינו יודעים משהו עליהם; [] אם לא נוכל להביעם במספרים [] תפישתנו לקויה". ואולם כפי שנווכח, כשמדובר בצבעים המספרים אינם "אובייקטיביים", אלא תלויים בדיווחו של "צופה ממוצע", ויכולים בהחלט להיות שונים במידה זו או אחרת באוכלוסיות אנוש שונות. אינני בטוח שלכך בדיוק כיוון הפיזיקאי הנודע, שעל שמו קרוי, בין השאר, סולם הטמפרטורות המוחלטות, סולם קלווין.

ניוטון: מנסרה ועיגול

צבע - זו הטענה העומדת כאן למשפט - איננו יש פיזיקלי, אלא יש תחושת; צבע - כמו חמימות או מתיקות, מרירות או כאב - הוא תחושה. לא אסתפק בטענה בעלמא, אלא אשתדל לספק עדויות והנמקות. אך כבר בשלב זה אני מבקש לתהות, בהנחה שצבע אכן איננו אלא תחושה (וראו: "רואים צבעים - על צבעים ועצבים",

בלשית, אגלה לכם: בארץ לא היתה עוד כלל טלוויזיה, קל וחומר צבעונית, וצגי מחשב צבעוניים היו רחוקים אף יותר (לפחות מבחינת הזמן) מהירח.

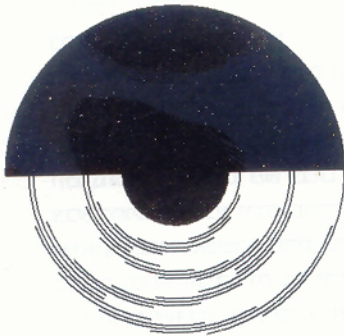
כרך אחר בסדרת סירס-זימנסקי עסק, בין השאר, בתורת החום. אחד המושגים המרכזיים בכרך זה היה כמובן טמפרטורה - שהרי טמפרטורה היא יש פיזיקלי, משהו שניתן למדוד במכשיר מדידה. ועכשיו תארו לעצמכם שספר פיזיקה היה מתייחס לא למכשיר מדידה אלא לתחושת חמימות. מים שהטמפרטורה שלהם גבוהה אכן משרים תחושת חמימות. אבל תחושת חמימות נגרמת גם משתיית אלכוהול שהטמפרטורה שלו נמוכה למדי, או ממאכלים מתובלים, או ממים פושרים שטבלנו בהם יד שנגעה קודם לכן בקרח. תארו לכם שבספר פיזיקה היו מסבירים טמפרטורה מהי על פי תחושת החמימות שמשרה שתיית אלכוהול, מאכל מפולפל או מים פושרים. והנה - שומו שמים כחולים - זה בדיוק מה שעושים פעמים רבות כשמדובר בצבע. דבר זה תמוה ביותר, אף שמן ההיסטוריה של חקר האור ניתן אולי להתחקות אחר מקורו. נדמה כי סירס וזימנסקי עצמם חשו

"הלבן מכיל את כל הצבעים" - כך אפשר ללמוד מהמון ספרים ואנציקלופדיות, חוברות הוראה, כתבי עת ותוכניות טלוויזיה. וצריך אולי פעם שיקום מאן דהו ויגיש תביעה ייצוגית בשם הקוראים, התלמידים והצופים. העילה ברורה, בבחינת שחור על גבי לבן: לבן אינו מכיל את כל הצבעים! בהמשך אנסה לשכנע אתכם, כחבר קוראים-מושבעים, שהלבן איננו מכיל אלא לבן בלבד. ומשפט זה לא יסתיים בחוסר הוכחות.

פעם, לפני שנים רבות, למדו תלמידי תיכון פיזיקה מסדרת הכרכים "פיזיקה תיכונית" של סירס וזימנסקי; אחד מן הכרכים נקרא "תורת האור", ובו הפרק "צבעים". כדי להתבשמ מעט מניחוח היסטורי אצטט את משפטי הפתיחה של פרק זה: "שפעת הצבעים בתמונותיו של ירחון מודרני, צילומים צבעוניים לחובב ולצלם המקצועי, חפצי- בית פלסטיים עשויים בשלל צבעים, מצרכים עטופים בעטיפות ססגוניות [] הצבע הפך להיות ענייני לא של האמן בלבד, אלא גם של הפיסיקאי, הכימאי, האינגינר [!] והתעשיין". רגע, לא חסר פה משהו: - מה עם טלוויזיה צבעונית, וכמובן - צג מחשב?! מאחר שזה משפט ולא חידה

אלא מגירויים אחרים, מכאניים. לחץ קל מאוד עם הזרת על עפעפיה העצומים של עין משרה באנשים רבים תחושה של עיגול כהה (למשל כחול כהה) המוקף בטבעת בהירה (צהובה, אדומה). צבעים אנטאופטיים אלה במובהק אינם מופיעים בעקבות אורכי הגל הנפרדים שהופיעו בספקטרום שנתגלה לניוטון.

שינויים מתאימים בקצב של גירויי שחור-לבן גם הם יכולים לעורר תחושת צבעים שונים. זאת גילה כבר הפיזיקאי



סביבון פכנר/בנהאם: כשמתבוננים בדגם שחור-לבן זה כשהוא מסתובב במהירויות מתאימות, מופעלים בנו מסלולים עצביים המשרים תחושת צב.

ופסיכופיזיקאי גוסטב תיאודור פכנר (Fechner) שיצר (1838) סביבון צבוע שחור-לבן, סביבון שבעת סיבובו משרה תחושת צבעים, אותם כינה פכנר "צבעים סובייקטיביים". באופן בלתי תלוי גילו זאת אחריו אנשים נוספים, כולל יצרן הצעצועים בנהאם (Benham), שעשה חיל בשיווק "סביבון-הפלא" שיצר (1894), סביבון בנהאם. תוכלו להפעיל ללא טרחה מרובה סביבון כזה במחשב וכך לשלוט בקלות במהירות הסיבוב ובכיוונו - ובהתאם, בצבעים המופיעים, בעזרת האתר:

dogfeathers.com/java/fechner2.html
באתר זה תוכלו למצוא גם גרסה ליניארית ("ניסיעה" ולא סיבוב): dogfeathers.com/java/fechner.html

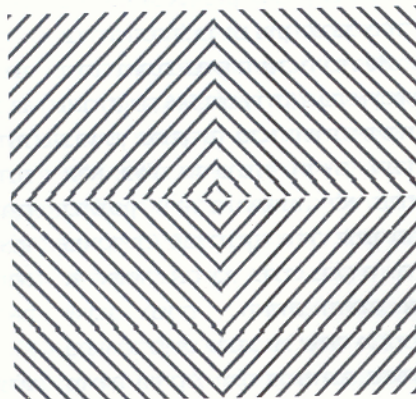
המתוק הצהוב בעיניים

אחד המאפיינים של החומר סוכרוז (דו-סוכר, הסוכר שקונים במכולת) הוא תחושת המתקות שהוא משרה בנו, ואחד המאפיינים של אורח הגל 575 ננומטר הוא ←

כמיני הארגמן (purple, magenta). במרכז העיגול ממוקם הלבן, ובשאר שטחו צבעים "לא רוויים", דוגמת ורוד וירקרק. יתר על כן, חיבור מתאים של אורות השוכנים משני צידיו של המרכז הלבן (אורות כאלה מכונים "אורות משלימים") יוצר לבן!

הצבעים מאין? יש מעין!

ועכשיו נעבור לשלב העדויות. התבוננו נא בדגם הקווים שכאן ושפטו, על תקן מושבעים: האם יש בו צבעים? אל נא תסתפקו במבט שטוח, אלא התבוננו זמן מה בדגם זה. לרבים מן המתבוננים מתגלים לפתע צבעים (כדי לזרז את הופעתם כדאי לנסות לעצום עין אחת). לא צבעים רוויים, אמנם, אבל צבעי פסטל רכים. מהיכן הם? בבית הדפוס השתמשו כאן אך ורק בדיו שחורה על רקע הלבן. אם כך, מהיכן הצבעים? מכשיר מדידה פיזיקלי, כל מכשיר מדידה פיזיקלי תקין, היה מדווח כאן על אזורים זהים לרקע הכללי - הלבן של הדף, וקווים זהים בתכונותיהם האופטיות לאותיות השחורות אותן אתם קוראים ברגע זה. כלומר, הדגם הודפס בשחור-לבן. מניין הצבעים, אם כך?



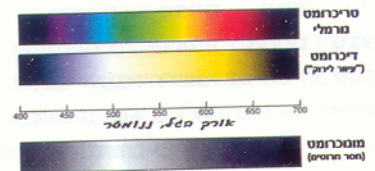
מתבוננים בדגם קווים זה, שהודפס בדיו שחור. רוב בני האדם חווים לאחר זמן מה צבעים - צבעים רכים, בלתי-רוויים, צבעי פסטל. צבעים אלה כלל אינם נובעים מאורכי גל שונים

ובכן, רשמו לפניכם: תחושת צבע אינה תלויה בהכרח באורכי הגל של האור. צבעים שאינם תלויים באורכי גל של אור יכולים גל להופיע כצבעים אנטאופטיים, לאמור - תחושות ראייה שאינן נובעות מגירויי אור,

גליליאו 42): אם הלבן מכיל - כפי שכתוב במקורות רבים כל כך - את כל הצבעים, האם אתה באמת רואה אדום כשאתה מביט בדגל לבן? האם את ממש רואה ירוק, אדום וכחול כשאת מתבוננת בדף חלק? מי שיטען שבצבע הלבן מבחינים באדום או בירוק מסתכן באשפוז כפוי. לא-כי, בצבע הלבן אין צבע אדום, ואין כחול ואין ירוק. אז מה קורה פה? כלום ניוטון טעה כשתיאר כיצד אור השמש הלבן עובר נפיצה לכל צבעי הקשת?

נתון דעתכם. ניוטון לא טעה. אור השמש אכן עובר נפיצה בעוברו מבעד למנסרה. לאמור: תערובת אורכי הגל של הקרינה האלקטרומגנטית היוצאת מן הפוטוספרה של השמש נפרדת לאורכי הגל השונים בעזרה דרך מנסרה שקופה. ואורכי גל שונים אכן משרים בנו תחושות של צבעים שונים. אבל התחושה "אני רואה לבן" בשום אופן איננה תערובת של התחושות "אני רואה סגול וכחול וירוק וצהוב וכתום ואדום ביחד!". לחלוטין לא. כפרפראזה על גרטורד שטיין בעניין הוודי אפטר לטעון: לבן הוא לבן הוא לבן.

למען האמת, ניוטון עצמו נוכח כי כשמדובר בצבעים, הספקטרום הפיזיקלי אינו חזות

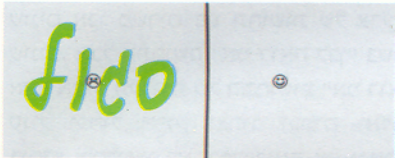


ספקטרום אור השמש המתגלה בניסוי נפיצה בעזרת מנסרה. מתחתיו - ניסיון להמחיש מה רואה דיכרומט, שרשתיות עיניו חסרות חרוטים (מדוכים) לאורכי הגל הבינוניים ("עיוורון צבעים לירוק"). אדם כזה חווה צבע, אבל עולם הצבעים שלו דל ביותר, ובספקטרום שלו נמצא לבן, שלא נמצא בספקטרום אותו חווה אדם בעל בעל ראיית צבעים תקינה. למטה: הספקטרום כפי שהוא מתגלה למונוכרומט שברשתיות עיניו אין כלל חרוטים.

הכול. בנוסף לספקטרום הליניארי שקיבל שירטט גם עיגול של צבעים, עיגול שבקו ההיקף שלו שוכנים צבעים רוויים, "מעגל הצבעים של ניוטון" - חלקם ספקטראליים וחלקם צבעים שאינם מופיעים בספקטרום,

צבעים נוגדים וניגוד בין פיזיקה לתחושה

העובדה שאי אפשר לערבב אורות צבעוניים מסוימים, כמו אדום עם ירוק (התוצאה איננה ירוק אדמדם, אלא צהוב) או כחול מתאים עם צהוב (התוצאה: לבן!) הייתה אחד הנימוקים שגרמו לפיזיולוג אוולד הרינג (Hering) להציע את "תיאוריית הצבעים הנוגדים" (1875). נימוק נוסף לתיאוריית הצבעים הנוגדים - צבעי גרר (after-image) שליליים. אם מתבוננים זמן-מה בצורה בעלת צבע מסוים ואז מעבירים את המבט למשטח אפור ("צבע ניטרלי"), רואים למשך זמן קצר את הצורה הקודמת, אך בצבע נגדי ("שלילי" לצבע המשרה).



ממקדים את המבט למשך 30 שניות בסמיילי הכועס - הוא זועם על הפער שבין הצבע לבין הכתוב. אז מעבירים את המבט אל הסמיילי השני - עכשיו הכתוב תואם את הצבע והסמיילי מאושר. הסגול מופיע כצבע גרר שלילי.

תהליכים נגדיים נוסח הרינג המתקיימים בראיית צבעים נובעים משלבי העיבוד העצבי של המידע שנקלט בחושים, אבל בכך הקדמתי את המאוחר. כשם ששום מכשיר פיזיקלי לא יצביע על דמיון כלשהו בין טמפרטורה גבוהה בחדר לבין דברים מביכים הנשמעים בחדר, הגם ששני המצבים הללו יכולים לגרום (דרך השפעתם העצבית) לסומק של עור הפנים, כך שום מכשיר פיזיקלי לא יצביע על דמיון כלשהו בין אור באורך-גל 575 נ"מ לבין תערובת אורכי הגל 545 נ"מ ו-650 נ"מ, אף שבשני המקרים אנו חווים (עקב תכונות עצביות של מערכת הראייה) תחושה זהה של צהוב!

כשם שמחט מזרק איננה כואבת כשלעצמה, כך גם לאורך גל אין צבע. כאב חשים אם המחט מפעילה תאי חוש לכאב (נוציספטורים) ומסלולים עצביים בגופנו,

של הצבעים כפי שהם נראים על גבי הצג - השחזור הוא מבחינת תחושות הצבע שלנו, לא מבחינת אורכי הגל המגיעים לעינינו מן התמונה.



אור אדום ואור ירוק הבוקעים מאלמנטים פולטי אור בצג המחשב או הטלוויזיה, כשהם מופעלים באותו אזור עצמו אנו רואים צהוב. המשוואה אדום + ירוק = צהוב מתקיימת רק במוחנו ובתפישתנו; אין לה שום בסיס פיזיקלי.

נדמה שניתן להמשיל עירוב של אור ירוק עם אור כחול ליצירתה של תערובת, וליתר דיוק - ליצירתה של תערובת הומוגנית, לאמור - תמיסה. כמו שבתמיסה שנוצרה מערבוב סוכר במים ניתן להוסיף ולהבחין בתכונות המים ובתכונות הסוכר, כך בטורקז (ציאן) ניתן להבחין ברכיבי הירוק וברכיבי הכחול. כך גם ניתן לערבב צהוב עם ירוק. ואולם במקרה של חיבור 650 נ"מ (אדום) עם 545 נ"מ (ירוק) - פה אין ערבוב צבעים, במובן זה שלא נוצרת "תערובת" אלא כעין "תרכובת" חדשה, הנבדלת לחלוטין (רק בתחושתנו, לא מבחינה פיזיקלית!) ממרכיביה: צהוב. למען הדיוק אי אפשר, אם כן, לדבר במקרה זה על ערבוב צבעים - האדום והירוק אינם מתערבבים; יש ערבוב של אורכי גל (מכשיר מדידה פיזיקלי יגלה כי מדובר בתערובת הכוללת שני אורכי גל נפרדים), אך לא של צבעים. הוספת אור 650 נ"מ לאור 545 נ"מ אינה דומה, אם כן, לערבוב סוכר במים, אלא להוספת חתיכת נתון למים - הנתון מגיב עם המים ונוצרת תרכובת חדשה, הידרוקסיד (הערה: זה דימוי בלבד של תחושת הצהוב שהופיעה; מבחינה פיזיקלית לא השתנה דבר באורות שהתערבבו, לא התרחש ביניהם שום "תהליך כימי").

תחושת צהוב שהוא משרה בנו. ואולם כשם שמתיקות אינה זהה לסוכרוז (שהרי גם החד-סוכר גלוקוז הוא מתוק, ואף סכרין, אספרטיים ודולצין שכלל אינם סוכרים), כך צהוב אינו זהה לאורך גל, אלא יכול להיות צבען של תערובות אורכי גל. וכשם שתחושת מרירות נגרמת על ידי קשת רחבה מאוד של חומרים שונים, כך תחושת לבן נוצרת בנו - כפי שניווכח בהמשך במו עינינו - על ידי מגוון עצום של תערובות אורכי גל שונים.

למען הדיוק ראוי להדגיש: מדובר בתערובות אורכי גל, לא בתערובות של צבעים. המושג ערבוב צבעים (או: פיתוך צבעים) במקרים רבים אינו תקף, אף שבמקרים מסוימים אכן יש לו משמעות. הכוונה היא זו: אם מערבבים (פותכים) צבע כחול עם צבע ירוק מתקבל טורקז (ציאן), צבע שאפשר לחוות בו מחוויית הכחול ומחויית הירוק גם יחד. במקרה זה המושג "ערבוב צבעים" הוא תקף. כך גם אם מערבבים אדום עם צהוב, שהרי תחושת הכתום קרובה במידת מה לחוויית האדום וגם לחוויית הצהוב. לא כן כשמערבבים אור באורך גל 545 ננומטר (נ"מ), הנראה כשלעצמו ירוק, עם אור 650 נ"מ, הנראה כשלעצמו אדום - תערובת האורות נראית צהובה. למען האמת כל כתם צהוב שאתם רואים על צג הטלוויזיה או המחשב עשוי מנקודות הפולטות אור אדום ונקודות נפרדות הפולטות אור ירוק - אין כלל בצגים אלמנטים הפולטים אור הנראה כשלעצמו צהוב. תוכלו להיווכח בכך בקלות בעזרת זכוכית מגדלת כשתבוננו באזור הנראה צהוב על הצג.

הערה: בניגוד לצגים, הנייר עליו מודפסות מילים ותמונות אלו הנראות לעיניך אינו כולל אלמנטים פולטי אור. מה שרואים כאן הוא אור שמקורו בשמש או במנורה שמוחזר מן הנייר ומהפיגמנטים השונים שהונחו עליו בדפוס. הפיגמנטים היוצרים כאן את התמונה שונים לחלוטין מהאלמנטים פולטי האור שבצג. ואולם בעזרת הטכניקות המתוחכמות של צילום צבעוני והדפסה צבעונית נעשה שיחזור מקורב

וצבע חשים כשאור מפעיל תאי חוש לאור (פוטורצפטורים) ברשתיות העיניים ומסלוליים עצביים. צבע, כמו כאב, אינו תכונה פיזיקלית, כי אם תחושה. כשמדובר בצבע, טענה זו נמצאת בסתירה למה שלימדו אותנו - או למה שחשבנו שמלמדים אותנו - ולפיכך היא דורשת הוכחה משכנעת. אך אם אכן תשתכנעו מן ההוכחה, תעלה מן הסתם שאלה נוספת, והיא: מדוע, אם כן, מתייחסים לצבעים בספרי פיזיקה? שהרי על כאב אין כותבים בספרי פיזיקה, אולי פרט לפרק שבו מנסים להסביר מדוע - הגם שקיים החוק השלישי של ניוטון, עקרון הפעולה והתגובה - סטירה כואבת למקבל יותר מאשר לסוטר. ואולי זו דוגמה טובה: הפיזיקה עוסקת בחוק השלישי, בעוד שתכונות העור ומיקום תאי החוש לכאב (וגם מצבו הפסיכולוגי של המוכה לעומת הסוטר) הם במפורש סיפור לא פיזיקלי. נראה שהסיבה לכך שבספרי פיזיקה מרבים לכתוב על צבעים, שהם תחושות, היא היסטורית בחלקה ופיזיקלית בחלקה. היסטורית - חוקרי האור, הצבע והראייה הראשונים (וענקי מדע עסקו בנושאים אלה: ניוטון, תומס יאנג, גיימס קלרק מקסוול, הרמן פון הלמהולץ; וגם ג'והן דלטון אבי התורה האטומית, שהיה "עיוור צבעים", ולמען הדיוק - כנראה דיכרומאט, "עיוור לירוק") לא תמיד יכלו להבחין לאיזה תחום קשורות התופעות, הפיזיקה גופה או הפיזיולוגיה של מערכת הראייה. והסיבה הפיזיקלית - אורכי גל שונים בתחום האור הנראה משרים תחושות של צבעים שונים. אך אל נא תיחפזו לחרוץ משפט: המשפט ההפוך איננו נכון. במפורש לא.

שלושה מיני חרוטים והשוואה אחת (בינתיים)

ניסוי נפיצת אור השמש בעזרת מנסרה של ניוטון היה, כמו צומת T, נקודת מוצא הן להתפתחות הפיזיקה של האור והן לביופיזיקה ולפיזיולוגיה של ראיית הצבעים. הקפיצה הבאה בפינוח מנגנוני ראיית הצבעים נעשתה למעלה ממאה שנה לאחר מכן על ידי הרופא, הפיזיקאי והאגיפטולוג תומס יאנג (Young), שהציע קיומם של שלושה סוגים שונים - שלושה בלבד - של

"יחידות קליטה"; זו התיאוריה התלת-צבעית (טריכרומטית). אמנם, לתיאוריה הטריכרומטית היו רמזים מטרימים במהלך המאות ה-17 וה-18, בין השאר מצד ציירים ודפסים. כך למשל מאריוט (Mariotte) הציע מנגנון תלת-צבעי ב-1681, והמשורר הרוסי מיכאיל לומונוסוב (Lomonosov) הציע ב-1757 כי ראיית צבעים מבוססת על קיום שלושה סוגי "חלקיקים". ובכל זאת, התובנה והקפיצה של יאנג היו ענקיות. הוא התרשם מן העובדה שבעזרת ערבוב של שלושה אורות צבעוניים בלבד ניתן ליצור מגוון עצום של צבעים, ומכך הסיק (1801) כי בעינינו קיימים שלושה סוגים של יחידות קליטה; כיום אנחנו יודעים כי יחידות קליטה אלו הן החרוטים (מדוכים) - תאי חוש לאור הפועלים בתאורה יחסית גבוהה ("ראיית יום"), העומדים בבסיס יכולתנו להבחין בצבעים. כעבור כיוכל שנים, ב-1852, פירסם הפיזיקאי ופיזיולוג הרמן פון הלמהולץ (von Helmholtz) נוסח מפורט יותר של התיאוריה הטריכרומטית, המוכרת כיום כ"התיאוריה התלת-צבעית (טריכרומטית) של יאנג והלמהולץ". 130 שנה לאחר מכן, בתחילת שנות ה-80 של המאה העשרים, נערכו מדידות ישירות, באמצעות מיקרו-ספקטרופוטומטר, של תכונות בליעת האור בחרוטים שברשתית אדם, והתברר כי הם אכן מתפלגים לשלוש קבוצות מוגדרות: חרוטים המיטיבים לבלוע אורכי גל קצרים (חרוטים "ליכול"; שיא בליעה 419 נ"מ), חרוטים המיטיבים לבלוע אורכי גל בינוניים (חרוטים "לירוק"; 531 נ"מ) וחרוטים המיטיבים לבלוע אורכי גל ארוכים יותר ("אדום"; 559 נ"מ).

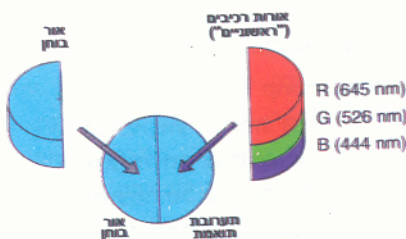
אך נשוב לאמצעה של המאה ה-19: הפיזיקאי הנודע גיימס קלרק מקסוול (Maxwell) ערך אז - בין שאר מפעלותיו המדעיים הכבירים, שהנודע בהם הוא חקר השדה האלקטרומגנטי - מדידות רבות של ערבוב אורות ותיאום צבעים. תיאום צבעים פירושו ערבוב מתאים של שלושה אורות עד שהתערובת הופכת מְקִטְרִית (לאמור - שוות-צבע בעיני הצופה) לצבע בוהן כלשהו.

כדי למדוד את "ערכי הכמותיים" של צבע כלשהו בעזרת תיאום צבעים יש להחליט על רכיביה של מערכת אורכי גל

תלת-צבעית שתשמש כבסיס למדידה. אין מדובר במערכת תלת-צבעית אוניברסלית, אלא בשלושה אורכי גל שנבדלים מספיק זה מזה, כך שאפשר לתאם בעזרתם מגוון רחב מאוד של צבעים. מקרינים את צבע הבוהן ובסמוך אליו תערובת של שלושת אורכי הגל המהווים את הרכיבים של מערכת המדידה. משנים את העוצמות של שלושת הרכיבים עד ששני כתמי האור - אור הבוהן ותערובת שלושת הרכיבים - נראים תואמים, מטמריים. "ערכיו" של צבע הבוהן הן העוצמות הנדרשות לשלושת רכיביה של מערכת המדידה.

בעקבות ניסויי הרבים שירטט מקסוול משולש שווה-שוקיים, שבקודקודיו אור ארוך-גל (אדום, R), אור באורך-גל בינוני (ירוק, G) ואור בעל אורך גל קצר (כחול, B) - משולש תיאום הצבעים של מקסוול. הבעיה עם תיאור עולם הצבעים כמשולש, משולש RGB, היא שחלק מן האורות הספקטראליים לא ניתן לתאם על ידי חיבור של שלושת רכיבי מערכת המדידה. ואולם ניתן לעשות זאת על ידי כעין העברה אלגברית מאגף לאגף: אחד משלושת רכיבי RGB, בעוצמה מתאימה, מוסיפים לאור הבוהן, ותערובת זו תואמים לצירוף שני אורות המערכת RGB הנתורים.

ראיית הצבעים התקינה, הטריכרומטית, מבוססת, אם כן, על שלושה סוגים של חרוטים ברשתית, הנבדלים ביניהם בתלות שבין מידת ההפעלה לבין אורך הגל (ספקטרום הפעילות). כמו כן נדרשת מערכת עצבית להשוואה בין מידת ההפעלה של החרוטים השונים. צבע הוא, אם כן, תחושה הנובעת מהשוואה עצבית של רמת הפעילות בשלושת סוגי החרוטים.

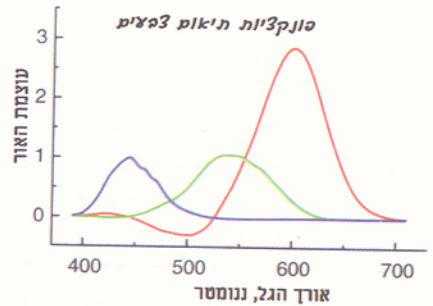


"מדידת" אור-בוהן תוך תיאום צבעים עם תערובת של שלושת רכיביה של מערכת המדידה. R - אדום, G - ירוק, B - כחול.

צבעים דמיוניים ועדות לבנה

ב-1931 התכנסה הוועדה הבינלאומית לתאורה (Commission International de l'Eclairage) במטרה להתגבר על בעיית הערכים השליליים בהצגתם של צבעים. הפתרון היה שירטוט משולש שקודקדיו אינם האורות הרוויים RGB, אלא אורות רוויים יותר מן האורות הספקטרליים, מעין אורות על-רוויים. אורות כאלה אינם קיימים בתחושתנו, אלא הם "אורות דמיוניים", יצירים תיאורטיים-מתמטיים.

ניתן אולי לנסות להמחיש, בבחינת דימוי, אור על-רווי בעזרת צבעי גר. אם מתבוננים זמן-מה באזור כחול, למשל, ואז מתיקים את המבט למשטח ניטרלי (אפור), חווים זמן מה, כצבע גר שלילי, כתם צהוב. ואולם מה יקרה אם מתיקים את המבט למשטח שהוא עצמו צהוב: דיאגרמת הצבעונית של הוועדה הבינלאומית לתאורה היא מישורית,



פונקציית התיאום עבור כל צבעי הספקטרום במערכת התלת-צבעית שרכיביה הם 645 נ"מ (אדום) + 526 נ"מ (ירוק) + 444 נ"מ (כחול). עבור כל צבע ספקטרוני ניתן לקבל צבע מטמרי על ידי צירוף של רכיבי המערכת התלת-צבעית בעוצמות המובעות בעקומות.

ומופיעות בה שתי קואורדינטות, X ו-Y. הכיצד? והרי ראיית הצבעים היא תלת-צבעית! זהו ההסבר: X מתאר את חלק העוצמה של אחד מרכיבי המערכת התלת-צבעית מתוך סך-כל העוצמה, וכך גם לגבי Y. הקואורדינטה השלישית משלימה, לפיכך, את ערך העוצמה ל-1. במילים אחרות, הקואורדינטה השלישית נקבעת לחלוטין על ידי שתי הקואורדינטות X ו-Y.

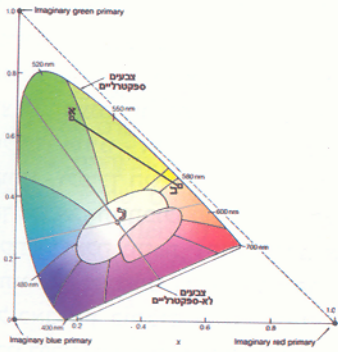
Y, כך שאין צורך לשרטטה, וניתן להסתפק בהצגה דו-ממדית, מישורית. הצבעים הקיימים בתחושתנו תחומים במשטח דמוי לשון, שהקו התוחם שלו



המשטח הצהוב כאן הוא הצהוב ביותר שיכול להפיק צג המחשב שלי, ובעקבותיו - הצהוב ביותר שיכולים להפיק צבעי הדפוס. אך אם ממקדים את המבט למשך כחצי דקה ב-X הלבן, ואז מתיקים את המבט ל-X השחור, מתוך המשטח הצהוב מופיע - כצבע גר שלילי - צהוב-על.

כולל את הצבעים הרוויים. החלק העקום של קו זה כולל את כל הצבעים הספקטרוליים בתחום הנראה לאדם (לערך בין 400 ני"מ ל-700 ני"מ). הקטע הישר המחבר את קצותיו של העקום כולל את הארגמניים הלא-ספקטרוליים. במרכז ה"לשון" נמצאת נקודת הלבן, והשטח שבין הלבן לקו התוחם מכיל צבעים לא-רוויים.

קטע כלשהו במשטח הצבעוניות מתאר את הצבע שיחווה אדם בעל ראיית צבעים תקינה מחיבור שני האורות שבקצות הקטע. כך למשל ניתן לקבל לבן מחיבור (פיתוד) מתאים של אורות ספקטרוליים משלימים (לאמור: שחיבורם יוצר לבן), כמו ירוק ספקטרוני עם תערובת ארגמנית, או כתום עם טורקיז. שימו לב: כתום + טורקיז = לבן. לבן זה הוא מטמרי, זהה לחלוטין בתחושתנו, ללבן המתקבל מפיתוח של כל הספקטרום, האור הלבן של השמש. קיומם של זוגות (רביים!) של "צבעים משלימים" מוכיח באופן מעשי ונחרץ כי הטענה "הלבן מכיל את כל הצבעים" אינה נכונה לא רק במובן התפישתי-תחושתי, אלא גם במובן הפיזיקלי הבסיסי והמעשי. לבן יכול להתקבל על ידי חיבור של כל אורות הספקטרום, או מחיבור של 15 אורכי גל שונים, או מחיבור 3 אורכי גל כלשהם בתנאי שאינם קרובים מדי, ואפילו מחיבור



תרשים הצבעוניות CIE 1931. קודקודי המשולש הם צבעים דמיוניים, על-רוויים. הצבעים הקיימים למעשה בתחושתנו תחומים במשטח דמוי הלשון. החלק העקום של הקו התוחם אותו כולל את הצבעים הספקטרוליים - זהו המרכיב היחיד שיש לו תוכן פיזיקלי (אף שמבחינה פיזיקלית הוא אינו אמור להיות עקום אלא ישר); כל שאר המשטח כולל תערובות אורכי גל שצבעיהן תלויים לחלוטין בתכונות מערכת הראייה שלנו, ולא בפיזיקה של האור. הערה: הצבעים המופיעים כאן הם המחשה מקורבת בלבד.

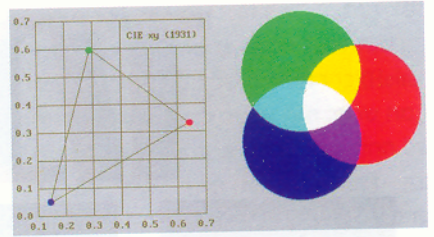
של שני אורכי גל בלבד, כזוגות של "צבעים משלימים". שפטו עתה בעצמכם: האם אכן "הלבן כולל כל הצבעים"?

ה-RGB הוא משולש פנימי בתוך משטח הצבעוניות, ובחירה נאותה של קודקודיו מאפשרת לתאום צבעים רבים ככל האפשר, אך לא את כולם - כדי לתאום את כל הצבעים נדרשים, כאמור, צבעים דמיוניים, על-רוויים.

חום, שחור ועיוורון צבעים

משטח הצבעוניות הוא למעשה חתך בגוף תלת-ממדי, שהממד השלישי בו הוא עוצמת התאורה הכללית. לפיכך מתחת לנקודת הלבן מצויה תערובת זהה בהרכבה אך שעוצמתה הכללית פחותה - אפור, ועמוק יותר - שחור. מתחת לאזור הצהוב-כתום שוכן החום, שאינו צבע ספקטרוני, וגם אינו תוצר של תערובת אורכי גל כלשהי, אלא הוא (כמו השחור) תחושה התלויה בעוצמה יחסית.

בדיכרומט - אדם שמסיבות גנטיות ברשתיות עיניו רק 2 סוגי חרוטים ולא שלושה, מצטמצם משטח הצבעוניות



משולש RGB הוא משולש פנימי בתוך משטח הצבעוניות דמוי הלשון. קודקודיו של משולש זה הם צבעים שאנו חווים ממש. חיבור שלושת הקודקודים, אדום + ירוק + כחול יוצר לבן. האומנם, הלבן כולל את כל הצבעים?

לקו. כלומר, איבוד של שליש מבין סוגי החרוטים אינו מצמצם את היכולת להבחין בצבעים בשליש, אלא מצמצם אותה במידה רבה מאוד. דיכרומט יכול לתאום צבע כלשהו תוך שימוש בשני אורות צבעוניים, ולא בשלושה כפי שנדרש לטריכרומט. מבחינים בין דיכרומטים החסרים את החרוטים לאורכי גל בינוניים ("ירוק"), לאלה החסרים חרוטים לאורכי גל ארוכים ("אדום"), ולאלה (מצב נדיר ביותר, שני הקודמים נפוצים למדי, ובעיקר בקרב גברים) החסרים חרוטים לאורכי גל קצרים ("כחול"). בשני המקרים האחרונים לא רק שיכולת ההבחנה בין צבעים מצומצמת, אלא שאצלם גם תחום האור הנראה קצר, קטוע - בכיוון אורכי הגל הארוכים, או הקצרים, בהתאמה. מי שברשתיות העיניים שלו סוג אחד בלבד של חרוטים (מצב נדיר מאוד) הוא מונוכרומט, ויכול לתאום כל צבע המוצג בפניו תוך שינוי עוצמה של כל אורך גל יחיד. משטח הצבעוניות מצטמצם עבורו לנקודה בלבד. כזכור, משטח הצבעים הוא חתך בגוף תלת-ממדי, שהממד השלישי בו הוא העוצמה, וממד זה קיים כמובן במונוכרומטים - הם מבחינים בדרגת הבהירות, אך לא בגוון כלשהו.

מצב נפוץ מעט יותר הוא חוסר מוחלט של חרוטים, עקב ליקוי גנטי. גם אנשים אלה הם מונוכרומטים, אם כי הם סובלים גם מסינוור בעוצמות אור רגילות ומחדות ראייה נמוכה מאוד.

פליטת קולמוס עיוורת

"כולנו עיוורי צבעים"; בהצהרה מטלטלת זו

(באנגלית) פותח מולון (J. D. Mollon) - איש קיימברידג', מי שנמנה עם קבוצת החוקרים הראשונה שבחנה במישרין את בליעת האור בשלושת סוגי החרוטים ברשתיות של אדם - את הפרק שלו "ראיית צבעים ועיוורון צבעים" בספר המיועד לתלמידים רפואה מתקדמים "The Senses". לא, הוא איננו מתכוון לכך שאנו עיוורי צבעים בתנאי ראיית לילה - בעוצמות אור כה נמוכות שמצליחות לעורר פעולה רק בקנים שברשתיות העיניים, אך לא בחרוטים, שרק הם מאפשרים ראיית צבעים. הוא גם אינו מתכוון לכך שבשולי שדה הראייה שלנו אכן איננו יכולים להבחין בצבעים, מפני ששולי הרשתיות אין חרוטים שונים.

לא, כוונתו של מולון אחרת היא, לאמור - שאנחנו עיוורי צבעים מפני שמערכת הראייה שלנו אינה מסוגלת לעשות אנליזה של אורכי הגל המגיעים לעינינו, כך שתערובות אורכי גל שונות לחלוטין נראות לנו בעלות אותו צבע, לאמור - כצבעים מטמריים. זוהי פתיחת פרק בהחלט דרמטית ומעוררת דריכות בקורא. אלא שהמחבר נגרר, שלא במתכוון, לשגיאה הנטועה כה עמוק, עד שגם מומחה ברמה הגבוהה ביותר, כמוהו, עלול להיכשל בה: אנו רואים צבעים דווקא מפני שאיננו עורכים אנליזה של אורכי הגל! צבע איננו אורך גל אלא דבר מה שונה לגמרי, סוג של תחושה, פרי פעילות מוחית. העובדה שאנחנו רואים צהוב בתערובת האורות 545 נ"מ + 650 נ"מ פירושה שאיננו עורכים אנליזה של אורכי הגל, אבל בה בעת פירושה שאנו רואים - ולא עיוורי - צהוב, וצבעים בכלל!

המציא שהתעורר וקיזוז אור הרקע

בשנות החמישים של המאה ה-20 השקיע אדווין לאנד (Land), ממציא סרט הצילום לפיתוח מייד, "פולרואיד", מאמץ ניסויי רב בפיתוח סרטי צילום צבעוניים. הוא השתמש בשקופיות שחור-לבן ובמסננים (פילטרים) צבעוניים בתהליך הצילום ובשלב ההקרנה. המסננים היו - תוכלו לשער - אדום, ירוק וכחול. ערב אחד, בסיום יום ניסויים מפרך שבו הוקרנו באמצעות שלושה מקרנים 3 שקופיות שחור-לבן של אותו נוף עצמו

(שצולמו מבעד לשלושה מסננים שונים), מבעד לשלושה מסנני הצבע, כיבה עוזרו את המקרן שבו מסנן כחול, ושלף כבר את המסנן הירוק מהמקרן השני. לרגע קט, לקראת כיבוי אורות כללי, הוקרנו שתי שקופיות זו על גבי זו, האחת מבעד למסנן אדום והאחת ללא מסנן כלל. ניתן היה לצפות כי התמונה כולה תהיה בגווני ורוד - למן אדום רווי ועד לבן ניטרלי. אבל באותו רגע קט העוזר שם לב כי תמונת הנוף מופיעה בשלל הגוונים המקורי, כולל ירק העצים ותכלת השמיים. "אה, התמונה עדיין צבעונית!" הסב העוזר את תשומת לבו של נשיא חברת פולרואיד. "טוב, זה בגלל הסתגלות (אדפטציה) לצבע", השיב לאנד כלאחר יד. אבל בשתיים בלילה קפץ ממיטתו כשהוא קורא "הסתגלות לצבע! איזו הסתגלות!!", רץ למעבדה והחל בסדרת ניסויים שנמשכה שלושים שנה. מחקריו הובילו אותו לפיתוח תיאוריה שקרא לה "טינקס (מיזוג של המילים האנגליות רשתית העין וקליפת המוח), ועיקרה שתחושת הצבע בכל נקודה בשדה הראייה אינה נובעת רק מהשוואת רמת הפעילות של שלושת סוגי החרוטים באותה נקודה, אלא השוואתה של תוצאה זו לנקודות אחרות בשדה הראייה. באופן כזה מערכת הראייה שלנו יודעת לקזז השפעות של הרכב אורכי הגל של האור, ומוזה את צבעי העצמים כקבועים פחות או יותר בתנאי תאורה שונים ביותר, בזריחה האדמדמה, כמו גם ביום ערפילי.

התובנה של לאנד העמידה בצל את ההסבר שהיה כה מקובל - ראיית צבעים טריכרומטית תלויה בהשוואת רמת הפעילות של שלושת סוגי החרוטים בכל נקודה. ואולם התיאוריה שלו והתובנה העולה ממנה מבליטות מאוד את עיקר הטענה, לפיה צבעים אינם בבחינת יש פיזיקלי, אלא חוויה שתלויה בתכונות מערכת הראייה שלנו, העורכת השוואה של רמת הפעילות של שלושת סוגי החרוטים בכל נקודה ברשתית, ואז משווה תוצאה זו למה שקורה בנקודות אחרות בשדה הראייה. וזה, למען הדיקו, רחוק מאוד מפיזיקה טהורה.

