



כל המרבה הרי זה משובח? פרפר עם 15 סוגים של קולטני אור בעין

Pei-Ju Chen, Finlay J. Stewart, Kentaro Arikawa*

המעבדה לנזירואֶתולוגיה, המחלקה למחקר אבולוציוני של מערכות ביולוגיות, אוניברסיטת סֶקֶנְדַּאי, היאמה, יפן

הטבע מלא צבעים, ובצבעים טמון מידע מועיל. צבעי הפרחים מפרסמים שיש בהם צוף, פירות מחליפים צבע כשהם מבשילים, וציפורים ופרפרים מוצאים בני זוג, או מבהילים אויבים, בעזרת כנפיהם הצבעוניות. כדי לנצל את המידע הזה, חיות צריכות גם לראות צבעים. לבני אדם יש ראייה תלת-צבעית (טֶרִיכְרוֹמָטִית) – כלומר, כל הצבעים שאנחנו מסוגלים לראות הם תערובת של שלושה צבעים ראשוניים: אדום, ירוק וכחול. זאת מפני שבעיניים שלנו יש שלושה סוגים של תאים קולטי-אור, שאחד מהם רגיש במיוחד לאור אדום, השני לירוק, והשלישי לכחול. למינים שונים של חיות יש סוגים שונים של תאים קולטי-אור. גם לדבורים יש שלושה סוגים, כמו לבני אדם, אלא שבמקום התאים הרגישים לאדום יש להם כאלה הרגישים לאור על-סגול. לפרפרים יש בדרך כלל שישה סוגים או יותר, אך גילינו מין אחד של פרפר זנב-סנונית שיש לו לפחות 15 סוגי תאים קולטי אור – יותר מאשר לכל חרק אחר. במאמר זה אנחנו דנים בשאלה איך נראה העולם לפרפר בעל עיניים מורכבות כל כך.

איך יודעים אם חיות רואות צבעים?

אנחנו, בני האדם, תלויים מאוד בראיית הצבע שלנו כדי להבין את העולם. צבע הוא תכונה של אור. אור נע בגלים, והמרחק בין גל לגל נקרא "אורך הגל". כשמגיע לעינינו אור באורכי גל שונים, אנחנו רואים צבעים שונים; אורכי גל ארוכים נראים אדמדמים, ואורכי גל קצרים

סוקרים צעירים

MELVILLE
SENIOR
HIGH
SCHOOL
גיל: 14-13



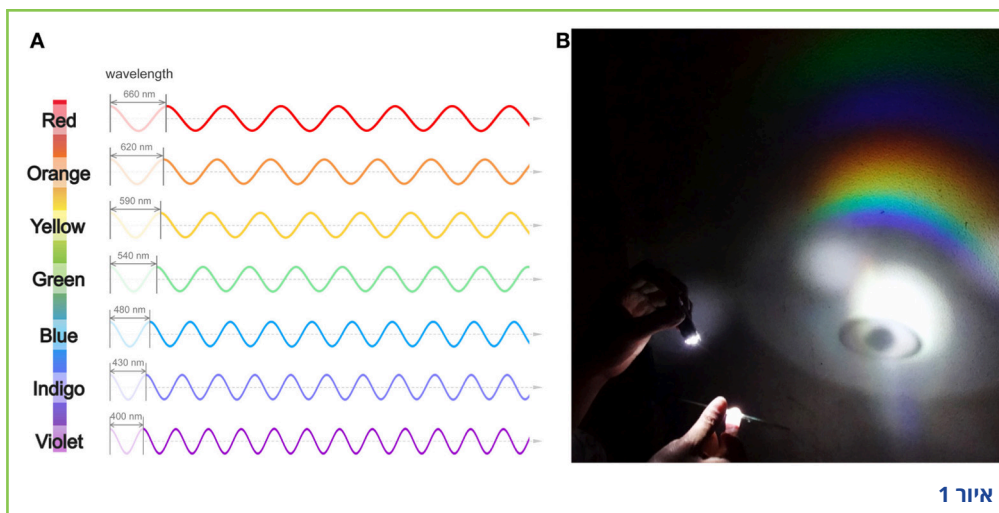
ראיית צבע

(Color Vision)

היכולת להבחין בין אורכי הגל שמהם מורכב אור, ולא רק בעוצמת האור.

איור 1

צבע ואורכי גל. **A.** אור נע בגלים. אפשר למדוד את אורך הגל, שהוא המרחק בין שני שיאים סמוכים שלו (כלומר, אורך מחזור אחד). אור באורכי גלים שונים נראה לעינינו כצבעים שונים; אורכי גל קצרים נראים כחלחלים, והארוכים יותר – אדממים. **B.** אור לבן מכיל אורכי גל רבים ושונים. אפשר להפריד אותו למרכיביו אם מעבירים אותו דרך מנסרה או מאירים על משטחים מחזירי-אור מסוג מסוים. דיסק (CD) הוא משטח כזה, כך שאפשר ליצור קשת פנס ודיסק.



איור 1

– כחלחלים (איור 1A). אור לבן הוא תערובת של כל אורכי הגל. אם תסתכלו בקשת בענן, או תשקפו אור מדיסק על משטח לבן (איור 1B), תראו איך האור מתפרק לסדרת צבעים אשר דומה לצבעי הקשת ונקראת "ספקטרום". טווח אורכי-הגל שאנחנו מסוגלים לראות נקרא "אור נראה", והוא משתרע מאורך גל של כ-400 ננומטר (קיצור nm; יחידת אורך של מיליארדית המטר), הנראה לנו סגול, עד לאורך גל של 700 ננומטר, הנראה אדום. יש גם אור מחוץ לטווח זה, אבל בני אדם אינם מסוגלים לראות אותו [1].

בעיניים שלנו נמצאים **תאים קולטי-אור הנקראים "קנים" (rods) ו"מדוכים" (cones)**. לקנים יש צורת מקל, ולמדוכים צורת חרוט. שני הסוגים מגיבים לאור, אבל הם ממלאים תפקידים שונים בראייה. קנים חשובים לראייה באור חלש, בלילה למשל, כי הם רגישים ביותר לאור. לעומת זאת, הם אינם קולטים צבעים. לכן העולם נראה לנו שחור-לבן באור ירח. כדי לראות צבעים אנחנו זקוקים למדוכים. מדוכים אחראים לראיית צבע, אבל כדי שיתפקדו יש צורך באור חזק. לבני אדם יש בדרך כלל שלושה סוגי מדוכים: כחול (B), ירוק (G) ואדום (R). כל אחד מהם רגיש לטווח מסוים של אורכי גל – מדוכים מסוג B מגיבים בעיקר לאור שאורך הגל שלו כ-420 ננומטר, מדוכים מסוג G לאורכי גל של 534 ננומטר, ומדוכים מסוג R – לאורך גל של 564 ננומטר [1].

אם מודדים כמה חזקה התגובה של המדוכים לאורכי גל שונים, אפשר לשרטט מה שנקרא "עקומת רגישות ספקטרלית" (כלומר, שמתייחסת לספקטרום). שרטוט כזה מופיע בחלק השמאלי של איור 2. לדוגמה, הרגישות הספקטרלית של מדוך B אצל אדם היא בשיאה כשאורך הגל 420 ננומטר, והיא יורדת לאפס כשהגל קצר מ-380 או ארוך מ-550 ננומטר. במילים אחרות, מדוך B יכול אמנם להגיב לאור באורך גל של 500 ננומטר, אבל התגובה חלשה. תהיה לו תגובה זהה לאור חזק באורך גל של 500 ננומטר (ירוק), ולאור עמום באורך גל של 420 ננומטר (כחול) – כלומר, הוא אינו מבדיל בין שני סוגי האור האלה. לו היו לנו רק מדוכים מסוג B, לא יכלנו להבחין בצבעים אלא רק בהבדלים בעוצמת האור (איור 2B). בעלי חיים רואים צבעים בעזרת השוואה: המוח משווה את מה שקולטים שני סוגי מדוכים או יותר, וכך הוא מעבד מידע על צבעים. לכן, כדי להבחין בין צבעים, דרושים לעין לפחות שני סוגים שונים של תאים קולטי אור.

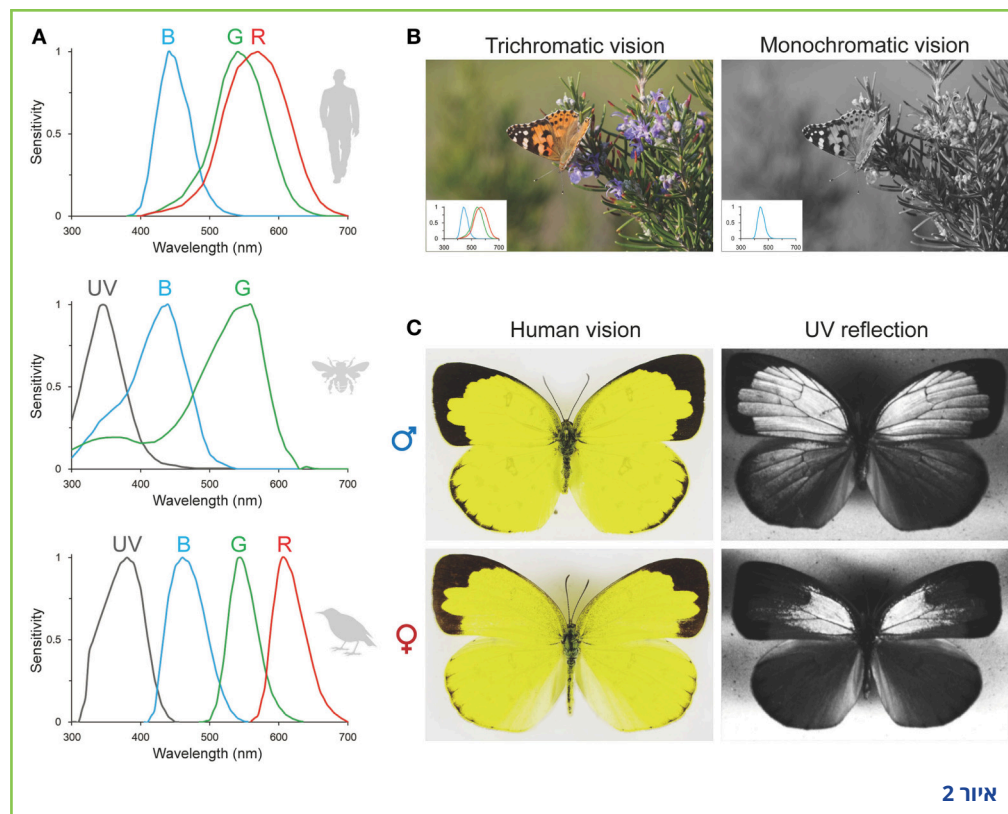
**תא קולט-אור
;Light-Sensing Cell
נקרא גם פוטוֹרֶפְטוֹר
(Photoreceptor)**

תא עצב מיוחד הממוקם בעיני בעלי חיים ושולח למוח אותות חשמליים כאשר הוא נחשף לאור.

איור 2

A. תאים קולטי אור אצל בני אדם, דבורי דבש וירגזים כחולים. בגרפים מופיעות עקומות הרגישות הספקטרלית של התאים קולטי האור בכל אחד ממינים אלה – כלומר באיזו מידה התאים מגיבים לאור באורכי גל שונים. לבני אדם (גרף עליון) יש שלושה סוגים של תאים קולטי אור (אצל בעלי חוליות הם נקראים "מדוכים" וצורתם הרוטית) ובאמצעותם אנו רואים צבעים. למדוכים שרגישים לאור כחול (B) יש רגישות גבוהה במיוחד לאורך גל של 420 ננומטר; למדוכים הרגישים לירוק (G) – לאורך גל של 534 ננומטר, ולמדוכים הרגישים לאדום (R) – לאורך גל של 564 ננומטר. לדבורי דבש (גרף אמצעי) אין תאים קולטי אור הרגישים לאדום, ובמקומם יש להן תאים הרגישים במיוחד לאור על-סגול (UV). לירגזי הכחול (גרף תחתון) ארבעה סוגים של תאים קולטי אור.

B. לבני אדם, שראיתם מתבססת על שלושה סוגים של תאים קולטי אור (ראייה טריכרומטית, או תלת-צבעית) קל לראות בצילום את פרפר נימפית החורשף ואת הפרחים הסגולים של הרזומרין על הרקע הירוק. אבל לבעל חיים שראייתו מבוססת רק על סוג אחד של תאים קולטי אור (ראייה מונוכרומטית, או חד-צבעית) קשה יותר לראות את הפרפר ואת הפרחים. **C.** על כנפי הפרפר הצהוב יש דוגמאות המחזירות אור על-סגול. התמונות משמאל צולמו במצלמה רגילה, הקולטת את מה שקולטת עין אדם. התמונות מימין צולמו באותה מצלמה, אך הפעם עם פילטר שדרכו עובר רק אור על-סגול (צילומים: Yuh-Tyng Lin).



איור 2

כך אנחנו יכולים לדעת אם גם לחיות אחרות יש ראיית צבע. אי אפשר, כמובן, לבקש מהן שיתארו את הצבעים שהן רואות, כפי שעושים בני אדם; לעומת זאת, אפשר לערוך ניסויים הבודקים התנהגות של חיות, וכך לדעת יותר על ראיית הצבע שלהן. אבל זה תהליך מסובך וקשה לביצוע, וראיית צבע נמצאה עד כה רק אצל מינים ספורים של חיות. בדרך כלל קל יותר לבדוק אם בעיניים של בעל חיים מסוים יש שני סוגים או יותר של תאים קולטי אור, כך שאנחנו יודעים שיש לו לפחות אפשרות להבחין בצבעים. כדי לזהות אילו סוגים של תאים קולטי אור נמצאים אצל חיה מסוימת, אנחנו משתמשים ב**אלקטרופיזיולוגיה**: מוודדים את האותות החשמליים שבאמצעותם העיניים שולחות מידע למוח. אנחנו מחזירים אלקטרודה לתא קולט-אור, ואז חושפים אותו לסדרת אורות מונוכרומטיים (כלומר חד-צבעיים. במילים אחרות, אור עם טווח מוגבל מאוד של אורכי גל). למשל, אנחנו עשויים לכסות את טווח אורכי הגל של 300 עד 700 ננומטר בשלבים של 10 ננומטר – כלומר, נאיר באור שאורך הגל שלו 300 ננומטר, אחריו באור שאורך הגל שלו 310 ננומטר, אחר כך 320, 330, וכן הלאה עד 700. אנחנו מתעדים את הפעילות החשמלית של התא בתגובה לכל אחד מהם, ובסופו של דבר יודעים איך התא הזה מגיב לכל אורכי הגל. אם נחזור על התהליך הזה עם תאים קולטי אור שונים הנמצאים בעיני בעל-החיים הזה, נדע לבסוף כמה תאים קולטי אור יש למין זה, ומאילו סוגים [2].

לבני אדם ולחיות אחרות יש סוגים שונים של תאים קולטי אור

האם מגוון תאי האור של כל בעלי החיים הוא כמו שלנו? גם לדבורים יש שלושה סוגי תאים כאלה, דומים למדוכים שלנו, אבל מכוונים לאור באורכי גל קצרים יותר: על-סגול (UV), כחול

אלקטרופיזיולוגיה (Electrophysiology)

תחום מחקר בביווגיה המתבסס על מדידת זרמים חשמליים בגוף יצורים חיים. אלקטרוקורדיוגרפיה ואלקטרואנצפלוגרפיה הן שיטות אלקטרופיזיולוגיות שמשמשות לבדיקות רפואיות אצל בני אדם.

וירוק, במקום כחול, ירוק ואדום (איור 2A). לכן, למשל, דבורים לא נמשכות במיוחד לפרחים אדומים: הן לא רואות היטב את הצבע האדום. כמו "עיוורי צבעים" מסוימים, קשה להן להבדיל בין אדום לירוק. לעומת זאת הן רואות דוגמאות של אור UV שהן בלתי נראות לנו, בני האדם. על עלי הכותרת של פרחים רבים ישנן דוגמאות הפולטות אור UV, וכך הם מאותתים לדבורים ולחרקים אחרים למצוא את הפרח ולהאביק אותו. גם ציפורים וחרקים מסוימים מזהים זה את זה באמצעות דוגמאות של אור UV. באיור 2C, למשל, תראו שני פרפרים צהובים, זכר ונקבה, הנראים לעינינו כמעט זהים. אבל אם מצלמים אותם במצלמה שרגישה רק לאור UV, האים בבירור שעל כנפי הזכר ועל כנפי הנקבה מופיעות דוגמאות שונות. מכיוון שבתוך עיני הדבורים יש תאים אשר קולטים אור UV אבל אין תאים הקולטים אור אדום (איור 2A), סביר להניח שהן רואות את העולם בצורה שונה מאוד מאיתנו.

לא לכל בעלי החיים יש שלושה סוגים של תאים קולטי אור, כמו לבני אדם ולדבורים. לציפורים רבות, למשל, יש ארבעה סוגי מדוכים, שקולטים קשת רחבה של אורכי גל: על-סגול, כחול, ירוק, וגם אדום (איור 2A). סביר להניח שהן גם מבדילות טוב מאתנו בין צבעים דומים. ציפורים מסוימות אפילו יכולות לשנות את רמת הרגישות של המדוכים לאורכי גל שונים. זאת באמצעות טיפות שמן צבעוניות הנמצאות בתוך עיניהן ופועלות כמו משקפי שמש עם עדשות צבעוניות. מנגנון כזה יש גם לחרקים מסוימים עם **עיניים מורכבות** [2].

עין מורכבת (Compound Eye)

עין מסוג הקיים אצל רוב החרקים והסרטנאים. היא מורכבת מיחידות רבות הנקראות אומטידיה (ביחיד אומטידיום). כל אומטידיום מורכב מעדשה ותחתיה צרור תאים קולטי אור.

גם לפרפרים יש ראיית צבע מורכבת. משערים שגם היא התפתחה מראייה המבוססת על תאים קולטי אור מסוג UV, B ו-G, כמו אצל הדבורים. במהלך מיליוני שנים השתכללה ראיית הצבע של פרפרים מסוימים ונוספו להם תאים נוספים הרגישים לאור באורכי גל אחרים, כנראה כדי לעזור להם במציאת פרחים למצוץ מהם צוף. לזנב-הסנונית הצהוב היפני (*Papilio xuthus*), למשל, יש שישה סוגים של תאים קולטי-אור: UV, V (סגול), B, G, R, ו-BB ("פס רחב") (איור 3A). תאי "פס רחב" מגיבים למגוון רחב של אורכי גל ולא רק לצבע מסוים אחד [3]. לאחרונה ערכנו מחקרים על הפרפר *Graphium sarpedon* (באנגלית common bluebottle), וגילינו שבעיניו יש לפחות 15 סוגים שונים של תאים קולטי-אור [4] (איור 3B) – המספר הגדול ביותר שנמצא עד כה אצל חרק.

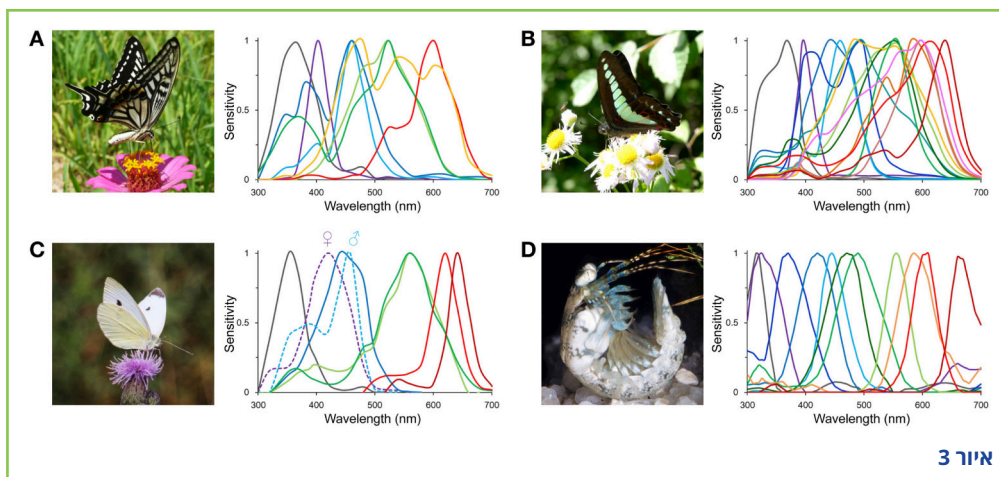
יש אפילו מיני פרפרים שהרגישות הספקטרלית שלהם שונה אצל זכרים ואצל נקבות – תופעה שנקראת "דימורפיזם מיני". אצל נקבות הפרפר הלבן הקטן *Pieris rapae* יש תאים רגישים ל-UV, ואצל הזכרים – תאים רגישים לכחול (איור 3C). אצל פרפר *Colias erate*, הדימורפיזם המיני מתבטא במגוון התאים הרגישים לאדום: לנקבות יש שלושה סוגים שרגישים לגוונים שונים במקצת של אדום, ולזכרים רק סוג אחד [5].

האם יש יתרון במספר גדול של תאים קולטי אור?

אולי אתם שואלים את עצמכם לשם מה הפרפרים צריכים מגוון כזה של תאים קולטי אור? האם זה משפר את ראיית הצבע שלהם? נבחן כמה דוגמאות. לבני אדם, כאמור, יש שלושה סוגי מדוכים. אבל יש אנשים (רובם ממין זכר) שאצלם רק שני סוגים מתפקדים באופן מלא, ואילו הרגישות של השלישי מוגבלת. זה המצב שאנחנו מכנים "עיוורון צבעים" [6]. כפי שראינו, שני סוגים של תאים קולטי אור מספיקים כדי לראות צבע, ולכן רוב "עיוורי הצבעים" רואים למעשה הרבה מאוד צבעים. אולי היה מדויק יותר לקרוא להם "לקויי צבעים". כאשר אדם עם ליקוי

איור 3

לבעלי חיים שונים יש רגישויות ספקטרליות שונות מאוד כאן מובאות ארבע דוגמאות: **A.** לפרפר זנב הסנונית הצהוב היפני, *Papilio Xuthus*, יש שישה סוגי תאים קולטי אור. בנוסף לעקומות שמראות רגישות מיוחדת לאור UV, סגול, כחול, ירוק ואדום, מופיעה כאן (בצהוב) גם עקומה המראה רגישות לטווח רחב של אורכי גל. **B.** לפרפר *Graphium sarpedon* יש 15 סוגים של תאים קולטי אור. רבות מעקומות הרגישות הספקטרלית שלו חופפות חלקית ודרושה תשומת לב כדי להבדיל ביניהן. **C.** ללבנין הצנון (*Pieris rapae*) יש שבעה סוגים של תאים קולטי אור. עיני הזכרים שונים מעיני הנקבות. הקווים המקווקווים מתייחסים לסוגי תאים שנמצאים רק אצל אחד המינים. **D.** לחסילון המנטיס, *Haptosquilla trispinosa*, יש 16 סוגים של תאים קולטי אור. עקומות הרגישות של 11 מהם מופיעות כאן. יחסית לגרף של *Graphium sarpedon*, העקומות כאן צרות יותר והמרווחים ביניהן אחידים יותר, כך שאפשר לשער שמוח חסילון המנטיס מעבד מידע על צבע בצורה שונה (Thoen ועמיתיו, 2014; צילום: Roy Caldwell).



איור 3

בראיית צבעים ואדם עם ראייה תקינה מסתכלים באותו מראה, הם עשויים לראות דברים די שונים, כי לאנשים עם ליקוי בראיית צבעים קשה בדרך כלל להבחין בין אדום לירוק. כלומר, כאשר יש פחות תאים קולטי אור, היכולת לראות צבעים מוגבלת. לעומת זאת, יש מקרים נדירים ביותר של נשים (בלבד) בעלות ארבעה סוגי מדוכים. משערים שהן רואות מגוון גדול בהרבה של צבעים מאשר אנשים עם ראייה רגילה, כי המדוך הנוסף מאפשר להן לראות צבעים נוספים שאחרים אינם רואים [7]. מסתבר, אם כן, שסוגים רבים יותר של תאים קולטי אור משפרים את ראיית הצבע.

המגוון העשיר ביותר של תאים קולטי אור שהתגלה עד כה שייך לחסילון המנטיס (נקרא גם חסילון גמל שלמה) אשר חי בשוניות אלמוגים. בעיניו יש עד 16 סוגי תאים כאלה (איור 3D). [5]. מתבקש לחשוב שראיית הצבע של היצור הזה טובה מזו של כל בעל חיים אחר. אבל מתברר שהיא דווקא גרועה להפתיע [8]. בני אדם מסוגלים להבחין בין אורכי גל אפילו כשההבדל ביניהם הוא ננומטר אחד בלבד. אבל חסילון המנטיס מתקשה להבדיל ביניהם אפילו כשההפרש הוא 15 ננומטר. מסתבר שמוחו מעבד מידע על צבע באופן שונה מהמוח של בעלי חיים אחרים. יש חוקרים שסבורים שהמוח של חסילון המנטיס, בניגוד למוחן של חיות אחרות, אינו משווה את המידע המתקבל מכל סוגי התאים קולטי האור, אלא עושה "קיצור דרך" כלשהו וכך מזהה צבעים במהירות אך לא בדיוקנות.

לפרפר זנב-הסנונית היפני הצהוב, *Papilio Xuthus*, יש ראיית צבע טובה; הוא מבחין בהבדלים של ננומטר אחד באורכי הגל, בדומה לבני אדם. לפרפרים אלה יש לפחות שישה סוגים של תאים קולטי-אור, אבל האם הם אכן משתמשים בכלם כדי לראות צבעים? כדי לענות על השאלה נערך ניסוי שבו אילפו את הפרפרים להבדיל בין שני אורות עם אורך גל מעט שונה, ויצרו הדמיית מחשב כדי לצפות איך יתנהגו במצב כזה פרפרים עם צירופים שונים של תאים קולטי אור. כשהשוו את תחזיות ההדמיה להתנהגות של הפרפרים במציאות, המסקנה הייתה שראיית הצבע שלהם מתבססת בעיקר על תאים מסוג UV, B, G, R, ולכן אפשר לשער שמדובר במערכת של ארבעה צבעים, כמו אצל ציפורים. שני הסוגים האחרים של תאים קולטי אור, BB ו-V, לא משמשים אותם כנראה לראיית צבעים, אלא לתפקודי ראייה אחרים. ייתכן שתאי UV, B, G ו-R מתפקדים אצל הפרפרים כפי שמדוכים מתפקדים אצל בני אדם, ותאי BB ו-V תאי V ממלאים תפקיד דומה לקנינים.

ובכן, האם ראיית הצבע היא טובה יותר ככל שיש יותר סוגים של תאים קולטי אור? האם לדעתכם פרפר *Graphium sarpedon*, שבעיניו יש 15 סוגים של תאים כאלה (איור 3B), הוא צבעים טוב מאיתנו? עדיין לא ידוע. את התשובה נוכל למצוא רק באמצעות ניסויים על התנהגות פרפרים. אולם, לפי מה שידוע לנו בינתיים על ראיית צבע אצל בני אדם ואצל פרפרים, לא סביר שכל 15 סוגי התאים משמשים רק לראיית צבעים. אנחנו סבורים שלמעשה משמשים לכך רק ארבעה מהם, כמו אצל *Papilio*, שיש לו קירבת משפחה הדוקה למין זה. בהשוואה לאדם, הוספת תאים קולטי אור מסוג UV המגדילים את טווח האור הנראה אל אזור העל-סגול, בהחלט מרחיבים את מגוון הצבעים שאפשר לראות. ייתכן שאחד-עשר הסוגים הנותרים משמשים את הפרפרים לאיתור גירויים מסוימים – למשל, ראיית עצמים אשר נעים במהירות על רקע השמיים, או אור באורכי גל מסוימים המוחזר מבני זוג או אויבים אפשריים.

איך אפשר להשתמש בממצאים אלה בעתיד?

לנו אין אפשרות לראות את העולם כפי שפרפרים רואים אותו: העיניים והמוח שלנו פשוט אינם בנויים לזה. אבל מעניין ומלהיב לנסות להבין את חוויית הראייה של פרפר, בעזרת ממצאים מניסויים שונים. אנחנו רוצים גם ללמוד איך התפתחו מנגנוני ראיית צבע במהלך הזמן, ולכן אנחנו משווים את ראיית הצבע של חרקים רבים ושונים. אולי תוך כדי כך אפילו נגלה עקרונות שיאפשרו לנו לבנות מערכות "ראייה" משופרות למכשירים מבוססי בינה מלאכותית. ציפורים וחרקים מסתמכים על חוש הראייה שלהם כדי להנחות את מעופם, למצוא מזון, ולהתרחק ממכשולים וטורפים. תארו לכם שנוכל, למשל, לתכנת כלי טיס או שיט לא מאוישים כך שישתמשו ב"עיניים" (מצלמות) לנווט את עצמם במיומנות המופלאה של בעלי חיים אלה!

עוד שימוש אפשרי לממצאים שלנו קשור לחקלאות. חקלאים רבים משתמשים כיום בקוטלי חרקים כימיים כדי להגן על יבוליהם. למרבה הצער, לא פעם החומרים האלה מזיקים לסביבה, והחרקים אף יכולים לפתח עמידות בפניהם. אולי נוכל לפתח שיטה נקייה ובטוחה להרחיק חרקים מגידולים חקלאיים באמצעות אור במקום באמצעות כימיקלים. לשם כך צריך קודם כל להבין איך עיניהם פועלות.

מאמר המקור

Chen, P.-J., Awata, H., Matsushita, A., Yang, E.-C., and Arikawa, K. 2016. Extreme spectral richness in the eye of the common bluebottle butterfly, *Graphium sarpedon*. *Front. Ecol. Evol.* 4:1–12. doi: 10.3389/fevo.2016.00018.

מקורות

1. Land, M. F., and Nilsson, D.-E. 2002. *Animal Eyes*. Oxford: Oxford University Press.
2. Cronin, T. W., Johnsen, S., Marshall, N. J., and Warrant, E. J. 2014. *Visual Ecology*. Princeton, Oxford: Princeton University Press.
3. Arikawa, K. 2003. Spectral organization of the eye of a butterfly, *Papilio*. *J. Comp. Physiol. A* 189, 791–800. doi: 10.1007/s00359-003-0454-7

4. Chen, P.-J., Awata, H., Matsushita, A., Yang, E.-C., and Arikawa, K. 2016. Extreme spectral richness in the eye of the common bluebottle butterfly, *Graphium sarpedon*. *Front. Ecol. Evol.* 4:1–12. doi: 10.3389/fevo.2016.00018
5. Marshall, J., and Arikawa, K. 2014. Unconventional colour vision. *Curr. Biol.* 24, R1150–R1154. doi: 10.1016/j.cub.2014.10.025
6. Backhaus, W. G. K., Kliegl, R., and Werner, J. S. 1998. *Color Vision: Perspectives from Different Disciplines*. Berlin, New York: Walter de Gruyter.
7. Jordan, G., Deeb, S. S., Bosten, J. M., and Mollon, J. D. 2010. The dimensionality of color vision in carriers of anomalous trichromacy. *J Vis* 10, 12. doi: 10.1167/10.8.12
8. Thoen, H. H., How, M. J., Chiou, T. H., and Marshall, J. 2014. A different form of color vision in mantis shrimp. *Science* 343, 411–413. doi: 10.1126/science.1245824

פורסם אונליין: 10 באוקטובר 2019

נערך על ידי: Wayne Iwan Lee Davies, University of Western Australia, Australia

ציטוט: Chen P-J, Stewart FJ, Arikawa K (2019) כל המרבה הרי זה משובח? פרפר עם 15 סוגים של קולטני אור בעין. *Front. Young Minds*. doi: 10.3389/frym.2017.00070-he

תורגם והותאם:

Chen P-J, Stewart FJ and Arikawa K (2018) The More, the Better? A Butterfly with 15 Kinds of Light Sensors in Its Eye. *Front. Young Minds* 5:70. doi: 10.3389/frym.2017.00070

הצהרת ניגוד אינטרסים: המחברים מצהירים כי המחקר נערך בהעדר כל קשר מסחרי או פיננסי שיכול להתפרש כניגוד אינטרסים פוטנציאלי.

COPYRIGHT © 2018 © 2019 Chen, Stewart and Arikawa. זהו מאמר בגישה פתוחה שמופץ תחת תנאי רישיון Creative Commons Attribution License (CC BY). השימוש, ההפצה או ההעתיקה מותרים לשימוש בפורומים אחרים ובלבד שיינתן קרדיט למחברים (המקוריים ולבעל זכויות היוצרים, ושהפרסום המקורי בעיתון זה מצוטט בהתאם למקובל באקדמיה). השימוש, ההפצה או ההעתיקה אינם מותרים אם הם אינם עומדים בתנאים אלה.

סוקרים צעירים

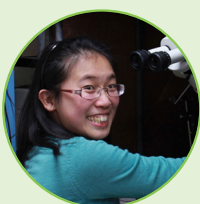
MELVILLE SENIOR HIGH SCHOOL, גיל: 13-14

קבוצה יוצאת דופן של אוהבי מדע, שבמשך השנתיים האחרונות משכללים את מלאכתם יחד. אנחנו מאמצים בחום את ההגדרה "חנונים" ונהנים לחקור את כל הקשור במדע.

הכותבים

PEI-JU CHEN

דוקטורנטית באוניברסיטת סוקנדאי. השלימה תואר שני באנטומולוגיה (חקר חרקים) באוניברסיטה הלאומית של טאיוואן ב-2012. במקור היא מטאיוואן, אי קטן ושופע פרפרים. מכיון שהם ניזונים מפרחים ובעלי כנפיים צבעוניות, היא מתעניינת איך התפתחה ראיית הצבע שלהם במהלך האבולוציה. היא חקרה את מערכת



הראייה של כמה סוגי פרפרים מנקודת ראות של מדעי המוח. מטרת הפרויקט הנוכחי שלה היא להבין איך מוח הפרפר מעבד מידע על צבע אחרי שקולטי האור השונים בעיניו מבחינים בנוכחות אור.



FINLAY J. STEWART

חוקר לניורואתולוגיה (חקר ההשפעה של המוח על ההתנהגות) חישובית בסוקנדאי, בעל תואר מאוניברסיטת אדינבורו שבבריטניה. ב-2009 השלים את עבודת הדוקטורט שלו על השימוש של זבובני פירות בחושי הראייה והריח כדי למצוא מזון. מאז 2012 הוא חוקר את מערכות הראייה של פרפרים. הוא בא מרקע של מדעי המחשב, ומתעניין בשימוש בשיטות חישוביות על מנת לחקור את פעולת המוח אצל חרקים, בעיקר באמצעות חקר התנהגותם.



KENTARO ARIKAWA

פרופסור לניורואתולוגיה בסוקנדאי. למד בקולג' Jiyu-Gakuen באוניברסיטת סופיה. בשנה הראשונה של התואר השני גילה שפרפרים יכולים להבחין באור באמצעות איברי המין שלהם, וחקר את המערכת הייחודית הזאת בעבודת הדוקטורט שלו. הוא לימד ביולוגיה באוניברסיטת יוקוהאמה במשך 21 שנה, ועבר לסוקנדאי בשנת 2006. בנוסף היה עמית מחקר באוניברסיטה הלאומית של אוסטרליה, במכון מיטסובישי-קאסי למדעי החיים ובמכונים הלאומיים לבריאות, וחוקר מטעם JST-PRESTO. [*arikawa@soken.ac.jp](mailto:arikawa@soken.ac.jp)

Hebrew version
provided by

מוזיאון המדע ע"ש בלומפילד ירושלים (ע.ר.)
متحف العلوم على اسم بلومفيلد القدس
Bloomfield Science Museum Jerusalem

