

פוטוניקה – תעלולי הצבע של הטבע / פיליפ בול

<http://www.hayadan.org.il/photonics-color-170912>

מאת סיינטיפיק אמריקן ישראל 17 באוגוסט 2012

הבנה של שבע טקטיקות מתוחכמות, שבעלי חיים משתמשים בהן כדי ליצור גוני צבע מרהיבים, עשויה להוביל לטכנולוגיות חדשות ומתוחכמות

הגוונים המשתנים של נוצות זנב הטווס המרהיבות גירו תמיד את דמיונם של מוחות סקרנים. רוברט הוק, המדען האנגלי בן המאה ה-17, כינה אותן "יצירי פנטזיה", בין השאר מכיוון שהרטבת הנוצות גרמה לצבעים להיעלם. הוק חקר את הנוצות בעזרת מיקרוסקופ, שהומצא זמן לא רב לפני כן, וגילה שהן מכוסות רכסים זעירים. הוא הסיק שייתכן שהרכסים האלה הם המפיקים את צבעי הצהוב, הירוק והכחול הבוהקים.

קרדיט: ג'ן כריסטיאנסן

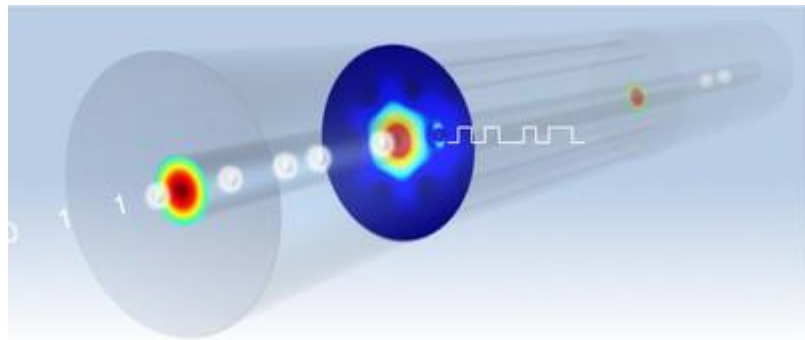
הוק היה בכיוון הנכון. הצבעים העזים של נוצות הציפורים, כנפי הפרפרים וגוף הדיונונים נוצרים לעתים קרובות לא על ידי חומרים צבעוניים, צבענים או פיגמנטים בולעי אור, אלא על ידי מערכים של מבנים זעירים, שרוחבם מאות ננומטרים בלבד. הגודל של המבנים האלה והמרווחים ביניהם גורמים לבידוד של אורכי גל מסוימים מתוך הספקטרום המלא של אור השמש. הגוונים האלה לרוב גם מתחלפים, משתנים כמו בקסם מירוק לכחול או מכתום לצהוב, בהתאם לזווית שממנה אנו מביטים על בעל החיים. מכיוון שהצבעים נוצרים מהחזרה של אור בלבד, ולא מבליעה של חלק ממנו כמו בצבענים, הם בוהקים יותר: אפשר להבחין בפרפר המורפו הכחול (Blue Morpho), שחי בדרום אמריקה ובמרכזה, אפילו ממרחק של קילומטר. נדמה שהוא זוהר ממש כשאור שמש חודר מבעד לעלוות היער הטרופי ומוחזר מכנפיו.

מדענים מתחילים לקבל תמונה שלמה יותר של האופן שבו מבני-ננו מסודרים בקפידה בבעלי חיים מתמרנים את האור, והדבר מעניק השראה למהנדסים לחקות את העיצובים הביולוגיים בחומרים אופטיים חדשים מעשה ידי אדם. החומרים האלה יכולים להביא ליצירת צגי מחשב בוהקים יותר וחיישנים כימיים חדשים, וכן לאחסון, לשידור ולעיבוד יעילים יותר של מידע.

איננו יודעים הרבה על האופן שבו המבנים הביולוגיים האלה התפתחו במהלך האבולוציה, אבל לפחות אנו לומדים איך הם נוצרים ואיך הם מפיקים את הצבעים המרהיבים. לטבע אין טכנולוגיות מתוחכמות כמו אלומות אלקטרונים שיכולות לצרוב חריצים על גבי שכבות דקיקות של חומר, אז במקומן הוא מסתמך על תחבולות יצירתיות. אם יוכלו המהנדסים לשלוט במיומנות זו, ייתכן שיוכלו להפיק בדים שישנו את צבעם כמו שכבת ההסוואה של הדיונון, או שבבי מחשב שיעבירו מידע באמצעים אופטיים במקום חשמליים, ובמהירויות מסחררות. במאמר זה נסקור כמה מן התעלולים של הטבע ליצירת מבנים שמפיקים צבעים, ואת האופנים שבהם הממציאים האנושיים מנסים לנצל אותם.

1 שכבות על גבי שכבות

טכנולוגית סיבים אופטיים חדשה. איור: אוניברסיטת פן סטייט



הרכסים שגילה הוק על נוצות הטווס אכן מפזרים את האור, אבל הצבעים הבוהקים מגיעים בעיקר ממבני-ננו המצויים מתחת לפני השטח ואותם הוק לא היה מסוגל לראות. נוצות צבעוניות של ציפורים וקשקשי דגים ופרפרים מכילים לרוב שכבות או מוטות מיקרוסקופיים ומסודרים של חומר דחוס מפזר אור. מכיוון שהמרחק בין השכבות או המוטות קרוב לגודל אורכי הגל של האור הנראה, המבנים האלה גורמים לתופעה המכונה "עקיפה". קרני אור באורכי גל מסוימים מוחזרות מן השכבות ומתאבכות זו עם זו התאבכות "בונה" או "הורסת" באופן כזה שחלק מן הצבעים באור המוחזר מתחזקים ואחרים מתבטלים. תהליך זה אחראי ליצירת קשת הצבעים שאנו רואים כשאנו מטיים בזוויות שונות משטח מבריק של תקליטור/

בכנפי פרפרים, השכבות מחזירות האור במשטח החיצוני הקשיח (הקוטיקולה) של קשקשי הכנפיים עשויות מן הפולימר הטבעי כיטין, המופרד באמצעות חללים מלאי אוויר. בנצות הציפורים, השכבות או המוטות עשויים מלנין

ומשובצים בתוך קרטין – החלבון שממנו עשויות גם השערות והציפורניים שלנו. תעשיית האופטיקה כבר משתמשת בסריגי עקיפה, העשויים משכבות דקות במיוחד של שני חומרים שונים לסירוגין, כדי לבדד ולהחזיר אור בצבע מסוים במגוון מוצרים, מטלסקופים ועד לייזרים של מצב-מוצק.

הזכרים של ציפור גן-עדן ממין *Parotia Lawesii* מכניסים לתעלול הזה שינוי גאוני, כפי שגילה ב-2010 דוֹקְלָה כ' סְטֶבֶנְגָה מאוניברסיטת כרונינגן בהולנד. זיפים דקים דמויי שיער בנוצות החזה שלהם, הקרויים "סעפּעפּים", מכילים שכבות של מלין, במרווחים שיוצרים החזרות כתומות-צהובות בוהקות, אך שטח החתך של כל סעפּעפּ הוא בצורת האות V, עם משטחים אלכסוניים שמחזירים גם אור כחול. תנועות קלות של הנוצות במהלך טקס החיזור של הציפור יכולות להחליף את הצבע במהירות מכתום-צהוב לכחול-ירוק ובחזרה, והדבר מבטיח את תשומת הלב של הנקבות.

החוקרים לא ניסו לחקות את הפעלול הזה, אך סטבנגה סבור שתעשיות האופנה והרכב ינסו בסופו של דבר לשחזר שינויי צבע כאלה. פתותים זעירים דמויי V באריג יגרמו לשמלה לשנות את צבעה תוך כדי תנועת הלבבשת, ופתותים דומים בצבע של מכונית חולפת יגרמו לרכב לשנות את צבעו מן הקצה אל הקצה.

2 אפקט עץ חג המולד

הצבע הכחול המסנוור של הפרפרים ממין *Morpho didius* ו-*M. rethenor* אינו מתקבל משכבות מרובות של כיטין, אלא ממבני-ננו מורכבים יותר בקשקשי הכנפיים: מערכי כיטין הבנויים כמו עצי חג מולד ומגיחים מפני השטח החיצוניים של הקשקש. הענפים המקבילים של כל "עץ" פועלים כסריג עקיפה מסוג שונה: המערכים האלה עשויים להחזיר עד 80% מן האור הכחול הפוגע בהם. מכיוון שאינם שטוחים, הם מסוגלים להחזיר צבע יחיד על פני טווח רחב של זוויות צפייה, מה שמפחית מעט את הברק: בעלי חיים אינם מעוניינים תמיד שצבעם ישתנה כשמביטים בהם מכיוונים שונים.

כפי שהבחין הוק בנוצות הטווסים, כשנשפכים מים על כנפי המורפו הכחולות הם משנים את שבירת האור. נוזלים שונים בעלי מקדמי שבירה שונים יוצרים אפוא החזרות אור שונות. חוקרים בחברת GE Global Research מניסקיונה שבמדינת ניו יורק, בשיתוף עם חוקרים באוניברסיטת אולבני והמומחה לכנפי

פרפרים פיט ווקוסיק מאוניברסיטת אקסטר שבאנגליה, מפתחים מבנים מלאכותיים דמויי מורפו ליצירת חיישנים כימיים שיוכלו לזהות נוזלים שונים. החיישנים האלה ייצבעו בצבעים ייחודיים בהתאם לנוזל שעמו הם באים במגע. החוקרים משתמשים בטכניקות של מיקרו-ליתוגרפיה, שנלקחו מתעשיית המוליכים למחצה, כדי לחרוט את המבנים בתוך חומר מוצק. חיישנים כאלה יוכלו לזהות פליטות של חומרים מסוימים מתחנות כוח וזיהומים במי שתייה.

3 קעריות מחזירות אור

הצבע הירוק הבוהק של הפרפר "זנב סנונית אזמרגדי" (*Papilio palinurus*), הנפוץ בדרום-מזרח אסיה, אינו נובע מאור ירוק כלל. קשקשי הכנפיים מכוסים סבכה של גומות זעירות דמויות-קערית, שקוטרן מיקרונים ספורים. הגומות מרופדות בשכבות כיטין המופרדות על ידי אוויר, שפועלות כמראות בררניות. תחתית כל קערית מחזירה רק אור צהוב, ואילו הדפנות שמסביב למרכז הצהוב מחזירות רק אור כחול (ראו איור). העיניים שלנו אינן מסוגלות להפריד בין הצהוב לכחול בקנה מידה קטן כל כך, ועל כן מוחנו רואה את השילוב שלהם כצבע ירוק.

כריסטופר סאמרס ומוהן סריניווסראו מן המכון הטכנולוגי של ג'ורג'יה העתיקו שיטה זו להפקה של צבע. כדי ליצור את השקערוריות הקטנות, הם הניחו לאדי מים להתעבות כטיפות מיקרוסקופיות על פני שטח של פולימר בעת הפיכתו מנוזל למוצק. טיפות המים מצטופפות יחדיו על המשטח כמו שורות ביצים בקרטון ושוקעות לתוך היריעה. כשהפולימר מתמצק הן מתאדות ויוצרות פני שטח עם שקערוריות דמויות קערית. לאחר מכן, החוקרים משקעים שכבות דקות של טיטניום דו-חמצני ושל אלומיניום חמצני (אלומינה) לסירוגין בכל קערה, כדי ליצור מחזיר אור שמחקה את הציפוי הטבעי של הקעריות אצל הפרפרים.

אור שמנתר מעל פני היריעה המובנית הזאת נראה ירוק. עם זאת, כשמניחים את היריעה מתחת למערכת של מסננים מקטבים, האור הצהוב שמנתר ממרכז הקעריות נעלם, ואילו האור הכחול מן השוליים נשאר. המנגנון הזה יכול ליצור סימן אימות מובהק לכרטיסי אשראי ולכרטיסי חיוב אחרים: ציפוי מחזיר אור שנראה ירוק ופשוט יכלול, למעשה בהיחבא, חתימה צהובה וכחולה מקוטבת, שיהיה קשה לזייפה. אף על פי כן, סריניווסראו מודה שהסיבה העיקרית לניסיון לחקות את הצבע הירוק של הפרפר היא ש"הוא יפה לעצמו".

פרפר אחר, המכונה באנגלית "לב-פר ירוק טלאים" (*Parides sesostris*), יוצר צבע ירוק באמצעות מבנה-ננו אחר, גם הוא, ללא צבענים כלשהם. קשקשי הכנפיים שלו מתהדרים במערכים מיקרוסקופיים דמויי גביש של חורים. המערכים האלה, המכונים "גבישים פוטוניים", חוסמים לגמרי אור בפס מסוים של אורכי גל וגורמים לו לחזור. אבן החן לשם (אופל) היא גביש פוטוני, שעשוי מכדוריות זעירות וצפופות של צורן דו-חמצני (סיליקה) המפזרות אור ומעניקות לאבן את צבעי הקשת הבוהקים שלה. אפשר להשתמש בגבישים פוטוניים כדי להגביל אור לערוצים צרים וליצור מוליכי גלים ("גלבו") שיוכלו, אולי, לנווט אור בנבכי שבבי מחשב.

בעזרת מיקרוסקופ אלקטרוני אפשר לראות שקשקשי הכנפיים של פרפר לב הפר מציגים מערכים מאורגנים בדיגזג: טלאים של ספוג עשוי כיטין עם תבניות מסודרות של חורים שקוטרם כ-150 ננומטרים. כל טלאי הוא גביש פוטוני הקבוע בזווית שונה מעט מזו של שכניו, מבנה המאפשר לו להחזיר אור בחלק הירוק של הספקטרום מטווח רחב של זוויות פגיעה. כמה חידקוניות וחיפושיות אחרות יוצרות גם הן את צבעיהן הבוהקים באמצעות גבישים פוטוניים עשויים כיטין.

הביולוג ריצ'רד פראם מאוניברסיטת ייל ועמיתיו גילו כיצד הגבישים הפוטוניים האלה גדלים עם התפתחות הכנפיים של הפרפר הצעיר. בעיקרו של דבר, שומנים המצויים בתאים העובריים של קשקשי הכנף יוצרים, באופן ספונטני, תבנית תלת-ממדית, והכיטין מתקשה סביבם. עם מותו של התא השומנים מתפרקים, ונותרת תבנית עם חללים ריקים מסודרים.

יש חוקרים המנסים ליצור מבנים דומים מאפס. לדוגמה, מולקולות דמויות שומן המכונות "חומרים פעילי שטח" יוצרות ספוגים מסודרים, וכך גם המולקולות המכונות "בלוק-קופולימרים". אולריך ויזנר מאוניברסיטת קורנל השתמש בקופולימרים כאלה כדי לארגן חלקיקי-ננו של ניוביום וטיטניום דו-חמצני במבנים של "ספוגי-ננו" דמויי מינרלים.

למוצקים הנקבוביים האלה יכולים להיות שימושים רבים, לדוגמה תאים סולריים יעילים וזולים. יותר מזה, ויזנר חישב ומצא שלספוגי-ננו עשויים ממתכת, כגון

כסף או אלומיניום, תהיה תכונה מוזרה של מקדם שבירה שלילי, כלומר שהם יכולים לאפשר את האור "בכיוון הלא-נכון". אם יהיה אפשר לייצר חומרים כאלה, יהיה אפשר ליצור מהם עדשות-על למיקרוסקופים אופטיים, שיוכלו להראות גופים קטנים יותר מאורך הגל של האור – דבר שאינו אפשרי במיקרוסקופים רגילים.

5 סיבים גבישיים

בעלי חיים מסוגלים לעצב גבישים פוטוניים במגוון דרכים. הקוצים שעל גבי תולעים ימיות מסוימות, כגון Aphrodita ("עכבר הים") מכילים מערכים משושים של סיבים חלולים, שרוחבם כמה מאות ננומטרים. המערכים האלה עשויים מכיטין, והם חוסמים אור בחלק האדום של הספקטרום, מה שמעניק לקוצים של ה-Aphrodita צבע אדום בוהק.

לא ידוע אם התכונות האופטיות האלה משרתות תפקוד ביולוגי כלשהו אצל עכבר הים, אך אפשר בהחלט למצוא יישומים טכנולוגיים לסיבים בעלי השפעה כזאת על האור. פיליפ ראסל, העובד כעת במכון מקס פלאנק למדע האור בארלנגן שבגרמניה, חימם צורות של נימי זכוכית ומתח אותם כדי ליצור סיבים דקים שבתוכם עוברים חורים משושים צפופים. אם מוסיפים למרכז הצרור המקורי נימ רחב יותר, או מוט מוצק, הדבר יוצר במערך החורים פגם שדרכו יכול לעבור אור שייחסם על ידי הגבישים הפוטוניים מסביב. כך נוצר סיב אופטי מוגן בשכבה שהיא למעשה בלתי חדירה לאור בפס מסוים של אורכי גל.

האור "דולף" פחות מסיבי גביש פוטוני לעומת סיבים אופטיים רגילים, כך שהם יכולים להחליף את הסיבים הרגילים ברשתות תקשורת. הם יצרכו פחות אנרגיה, מה שיבטל את הצורך במגברים יקרים לחיזוק אותות המשודרים למרחקים גדולים. הסיבים הרגילים דולפים במיוחד כשהם מכופפים בחדות, בשל יעילות פחותה של ההחזרות ששומרות את האור בתוך הסיב. לגבישים פוטוניים אין בעיה כזאת, כי לכידת האור בהם אינה מבוססת על החזרה. לכן הם אמורים לפעול טוב יותר בסביבות קטנות וצפופות, וכך יהיה אפשר ליצור מיקרו-מעבדים מהירים הרבה יותר מן השבבים האלקטרוניים שבמחשבים ובטלפונים הסלולריים שלנו.

בשביל להפיק צבע, בעלי חיים מסוימים יוצרים מערכים ספוגיים בעלי תבנית חסרת סדר במקום תבנית מאורגנת. גרסה מבנית זו אחראית לנוצות הכחולות-ירוקות הנהדרות של ציפורים רבות, שלא ניחנו בצבעים הבוהקים שאפשר לראות על הצופית או הטווס. מכיוון שמבני הננו דמויי הספוג, העשויים מקרטין, אינם מסודרים, פיזור האור אינו ממוקד ודומה לכחול של השמים יותר מאשר לבוהק דמוי-מראה. זאת הסיבה לכך שהצבעים נראים אחידים מכל זווית.

אצל התוכי ממין ארה כחולה-צהובה (*Ara ararauna*) ואצל השלדג שחור הכיפה (*Halcyon pileata*), החללים הריקים שבמערכים של סעיפי הנוצות יוצרים תעלות מפותלות שרוחבן כמאה ננומטרים. רשת אקראית דומה בקוטיקולה של החיפושית *Cyphochilus* מעניקה לה שלד חיצוני בצבע לבן מסנוור. בציפור ממין מְנִקִין כחול-כתר (*Lepidothrix coronata*), חורי האוויר אינם תעלות אלא בועות זעירות המחוברות זו לזו.

ריצ'רד פראם מאוניברסיטת ייל סבור שהתעלות או הבועות נוצרות כשהקרטין נפרד מאליו, כמו שמן ממים, מן הנוזל שבתאים יוצרי הנוצות במהלך ההתפתחות המוקדמת. הוא סבור גם שהתפתחה אצל הציפורים דרך לשלוט בקצב שבו הקרטין נפרד, כך שיצירת התעלה או הבועה נפסקת כשהחללים הריקים מגיעים לגודל מסוים. גודל זה קובע את אורך הגל של האור המתפזר ולפיכך את צבע הנוצה.

פיזור אור בלתי מסודר קיים גם בחומרים טבעיים אחרים ובחומרים מעשה ידי אדם. בחלב, טיפות שומן זעירות בקשת רחבה של גדלים מפזרות את כל אורכי הגל הנראים ויוצרות לבנונית אטומה. פיט ווקוסיק מאוניברסיטת אקסטר חיקה את קוטיקולת החיפושית *Cyphochilus* באמצעות מערכים מנוקבים באקראי עשויים סידן פחמתי או טיטניום דו-חמצני מעורבבים עם פולימר, ויצר ציפויים דקים בצבע לבן עז. פראם ומהנדס הביוטכנולוגיה אריק דופריין, גם הוא מאוניברסיטת ייל, חיקו את הספוגים חסרי הסדר של נוצות הציפורים באמצעות יצירה של יריעות חרוזי פולימר מיקרוסקופיים מצופפים באקראי בעלות צבעים כחולים-ירוקים. גישות כאלה עשויות להביא ליצירת ציפויים בעלי צבעים עזים ואטומים מאוד על אף דקיקותם שלא ידהו לעולם, מכיוון שהיריעות אינן מכילות צבענים אורגניים.

7 חלבונים הפיכים

אחד התעלולים האופטיים מעוררי הקנאה ביותר של הטבע הוא יצירה של שינויי צבע הפיכים. דיונונים ממשפחת הלוליגיים (Loliginidae) משתמשים בחלבון הקרוי רפלקטין כדי ליצור צבעים בעורם ולשנותם. מולקולות החלבון מסודרות בערמות של לוחיות בתוך תאים המכונים אירידיופורים, שמחזירים צבעים ייחודיים. הביולוגים סבורים ששינויי הצבע נועדו להסוואה וכאמצעי תקשורת – לצורך חיזור והפגנת תוקפנות.

דניאל מורס מאוניברסיטת קליפורניה שבסנטה ברברה חוקר את האופן שבו האירידיופורים משנים צבע. חלבוני הרפלקטין מתקפלים והופכים לחלקיקי-ננו שמרכיבים את הלוחיות. הלוחיות נתונות בין קפלים בקרום של תא האירידיופור. החלבונים מצטופפים יחדיו כשניורטרנסמיטר מפעיל תהליך כימי המבטל את המטען החשמלי של הרפלקטינים. השינוי הזה מגביר את כושר החזרת האור של הלוחיות ומשנה את הרווחים ביניהן, וכך מתחלף הצבע. אפשר להשיב את המצב לקדמותו על ידי הטענת הרפלקטינים מחדש.

מורס סבור שהוא מסוגל לחקות את המנגנון הזה בהתקנים אופטיים, אולי אף באמצעות רפלקטינים אמיתיים. הצוות בראשותו הכניס לחיידקי אשריכיה קולי את הגן שמקודד את חלבון הרפלקטין אצל דיונונים ממין *Loligo pealeii*. כשהחלבון הזה מתבטא הוא קורס לחלקיקי-ננו, שאת גודלם אפשר לכוון בעזרת מלחים המווסתים את האינטראקציות שבין המטענים החשמליים של החלבונים. החומרים שמופקים עשויים להתנפח או להתכווץ כתגובה לאותות כימיים ולשנות את אורכי הגל המוחזרים.

מורס פיתח גם פולימר שהופך בבת אחת משקוף לאטום בתגובה למתחים חשמליים, שמשנים את כושר ההחזרה של הפולימר וגורמים לניפוח של היריעה הפולימרית באמצעות ספיחת מלח. אפשר לייצר בשיטות ייצור פשוטות התקנים שישתמשו בחומרים האלה. הצוות של מורס עובד עם חברת Raytheon Vision Systems מגולטה שבקליפורניה כדי ליצור מן החומר הזה צמצמים מהירים למצלמות אינפרה-אדום, שיאפשרו צילומי לילה במהירות גבוהה על סמך גילוי חום במקום אור.

הגשה כקובץ לתלמידים: מילכה ברקו גרש