

# "מבנים ננומטריים - גאומטריה שמשנה את העולם"

ירדן דניאלי\*

העולם לשלוט על הצורה (הגאומטריה) של הננו-חלקיקים ועל הערך המוסף שנותנת הצורה ליישומים וכן על תגליות מפתיעות. בכל אחד מהמחקרים שיוצגו כאן, הצורה משחקת תפקיד חשוב ומרכזי בהתנהגות המערכת. כל אחד מהמחקרים שיוצגו כאן יכול להוות מקור השראה עבור מורים לדיונים מעשירים בכיתה, לפרויקטים של הערכה חלופית ואפילו למטלה בבחינה, עטופה בסיפור מסגרת פיקנטי.

המאמר מזמין אתכם המורים, לערוך היכרות קצרה עם מחקרים מובילים על ננו-חומרים, כשבליבת הגילוי או המחקר עומדת צורה, או גאומטריה מבנית ייחודית, שמשנה ברמה הננומטרית את התכונות של החלקיקים ומהווה הכוח המניע שלהם לבצע את הפונקציה שעליה מדווחים. בסופו של כל דיווח מחקרי כזה תופיע פסקה ממני תחת הכותרת "**קצת השראה לתלמידים**". פסקה השמה דגש על המקומות שבהם אפשר לשלב את המחקר בהוראת המבנית, ובכלל במקומות רלבנטיים ברצף הוראת הכימיה בתיכון. שתילה של הרעיונות הללו בשלבים שונים של ההוראה יאפשרו לקבל תמונה גדולה שתתחבר לתלמידים אל

זה שנים רבות, מורים ברחבי הארץ בוחרים ללמד את תלמידיהם את מבנית הננו-כימיה. הבחירה היא כמעט טבעית. מדובר במבנית שמתארת את ליבת ההשתלבות של כימאים בטכנולוגיות מתקדמות, סגירת מעגל מושלמת לצעדים הראשונים ב"מבנה וקישור" וב"מבנה האטום" שלמדו הילדים בכיתה י', ובייחוד, היא מבנית שחיה בעולם דינמי ומשתנה שלא מפסיק לספק עניין ומקור לפעילויות העשרה ועומק בכיתה.

נושא הננו-טכנולוגיה מקבל את הביטוי המרכזי בעיקר לקראת סוף לימודי מבנית הבחירה, כאשר אנו מתחילים לדון עם התלמידים על המבנה האלקטרוני של מוצקים. פרק זה פותח בפני המורים דלת לחשוף את התלמידים להמצאות ותגליות בעולם החומרים הנקשרות לתכונות האלקטרוניות של מוצקים-שבבים מבוססי מוליכים למחצה וננו-חלקיקים מתכתיים ולדון עימם על המצאות ותגליות אלה. בפועל, עולם הננו-טכנולוגיה כולל דרגות חופש רבות ומגוונות, שלא כולן קשורות בהכרח למבנה האלקטרוני, וגם לא לגודל החלקיק. מטרתו של מאמר זה היא להרחיב מעט את היריעה על היכולת המגוונת של כימאים ברחבי

\* ירדן דניאלי, מורה לשעבר במסלול עתידים להוראת המדעים, וכיום סטודנט לתואר מוסמך למדעי הכימיה במחלקה לחומרים ופני שטח שבמכון ויצמן למדע, רחובות.

זה מזה כשהאלקטרון נמשך אל החלקיק המתכתי שבקצה, פנוי לבצע תהליכי חיזור לפי צורך. החורים שנעצרים בגביש המל"מ הופכים למעשה לאתר חמצון, ויכולים אף הם להשתתף בתגובות כימיות הנדרשות ליצירת רדיקלים המחוללים את תהליך הפלמור. ללא הגאומטריה הייחודית של המבנה, הפרדת המטען לא הייתה מתרחשת בנקל ומכאן גדולתו של מחקר זה.

**קצת השראה לתלמידים...** במקרה של מחקר זה, שהוא גם הראשון בסדרה, כמעט כל המושגים אמורים להיות מוכרים לתלמידים. אפשר לדבר על המחקר בהקשר של מוליכים-למחצה כמחזרים וכחמצנים (שאינם משתנים נטו בתגובה מבחינת מטען והרכב כימי), על התפקיד שהגאומטריה מילאה בהמצאה, על פולימרים ועל חומרים מרוכבים הבנויים מכמה סוגי חומרים - והגיוון שזה נותן לסל הכלים שלנו ככימאים. חשבו יחד עם תלמידים, אילו עוד שימושים יכולים להיות לחלקיקים מצורה זו?

## ננו-קוביות של חומרים מגנטיים - התארגנות ספונטנית של ננו-חלקיקים לסלילים כראליים<sup>2</sup>

**מה חדש?** השליטה על גאומטריה של ננו-חלקיקים מכל מיני צורות הפכה זה מכבר למומחיותו של פרופ' רפאל קליין ממכון ויצמן למדע. צוות המחקר של פרופסור קליין פיתח ידע נרחב באשר לשליטה על צורתיהם של ננו-חלקיקים על ידי ייצוב של מישורים גבישיים ספציפיים בגביש תוך כדי גדילתו (בדרך כלל על ידי שליטה באופי המגיבים ובתוספים כמו חומרים פעילי שטח). כך למשל, הוא הצליח לייצר ננו-חלקיקים בצורת קוביות סימטריות לחלוטין של כסף (Ag) ושל ברזל חמצני ( $Fe_2O_3$ ), חומר המכונה גם מגנטיט בשל התנהגותו תחת שדה מגנטי. שאלה מרכזית בתחום הננו-חלקיקים היא איך למצוא שיטות אלגנטיות ופשוטות לארגן אותם בצורות מורכבות יותר כמו סלילים, רצועות וכולי?

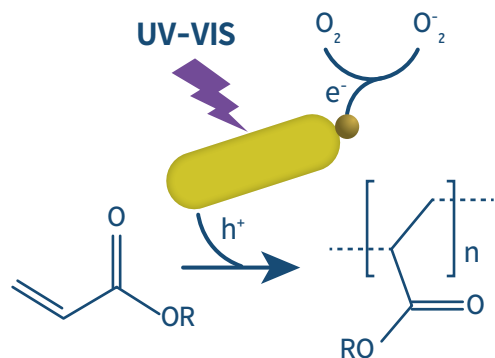
שינוי הצורה מחלקיקים כדוריים של מגנטיט לחלקיקים קובייתיים שלו גרר שינוי עצום של התנהגות החלקיקים תחת שדה מגנטי; שינוי הטמון כאמור ביכולת הפנימית של החלקיקים להתמגנט בכיוונים שונים כתוצאה משבירת הסימטריה של קובייה לעומת כדור. חישובים תאורטיים הראו כי הכיוון הזה בחלקיקים בצורת קובייה מקביל לאלכסון הקובייה - מה שכאמור הוביל להתארגנות של הקוביות בסמיכות זו לזו בכיוון שימקסם את האינטראקציה המגנטית הזו - מגע קדקוד אל קדקוד, בדיוק במקביל לאלכסוני הקוביות. ברמת הצבר, הדבר הוביל להתארגנות ספונטנית של החלקיקים אל סלילים הנראים כמו חבלים קלועים. זוהי דרך אלגנטית לארגן ננו-חלקיקים בצורה סלילית מורכבת ללא שימוש בשום תבנית וזאת על סמך הסימטריה הייחודית של חלקיקים מגנטיים שהתגבשו בצורת קובייה.

מול העיניים לקראת סיום לימודיהם במגמה בכיתה יב, ובעצם, זו הרי כל התורה של הוראה ולמידה משמעותית- היכולת לחבר את נושאי הבסיס שך הבחינה החיצונית אל מבניות הבחירה. אין ספק שזה יכול להעמיק מאוד את המסר המדעי אתו יסיימו התלמידים את לימודיהם.

## ננו-מוטות של מוליכים-למחצה בעלי יכולות קטליטיות משופרות<sup>1</sup>

**מה חדש?** במחקר משולב של פרופ' אורי בנין ופרופ' שלמה מגדסי מהאוניברסיטה העברית שבירושלים מצאו דרך חדשנית ומקורית לעודד תגובות פלמור ללא צורך בממס. כידוע, יצירת פולימר ממונומרים בשיטה של פלמור רדיקלי מצריך שימוש בחומר הקרוי איניציאטור. תפקידו של האיניציאטור הוא לייצר רדיקלים בתגובת שרשרת הגורמת למונומרים להתחבר זה לזה בקשרים קוולנטיים וליצור למעשה את המולקולה המוארכת של הפולימר. רוב האיניציאטורים משופעלים ליצירת רדיקלים תחת הקרנה של אור בתחום העל-סגול (UV) ונשמרים בתוך ממסים הידרופוביים במיוחד, מה שמגביל את השימוש שלהם בסביבות פולאריות.

במחקר הנ"ל פיתחו החוקרים מבנה היברידי הבנוי מננו-חלקיק מתכתי (זהב) וממוט מוארך המחובר אליו, שהוא למעשה גביש של מוליך למחצה (מל"מ). בזמן הקרנת המוליך-למחצה בקרינה המתאימה לעירור (יכולה להיות בתחום הנראה או בתחום העל-סגול כתלות בפער האנרגיה של המל"מ), ההקרנה מעוררת אלקטרונים לפס ההולכה, ויוצרת חורים בפס הערכיות, עד כה בתיאור של תהליך רגיל למדי גם עבור התלמידים. בנקודה זו נכנס החידוש הנובע מהגאומטריה הייחודית של המבנה. האלקטרונים והחורים נפרדים בתוך המוט המוארך ומורחקים



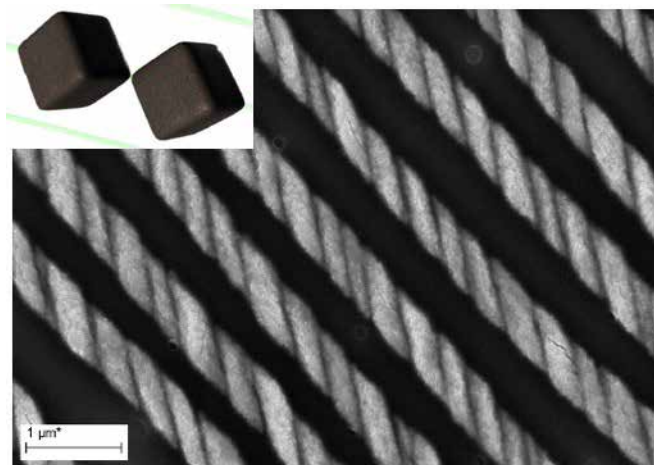
מיצג 1: תרשים סכמתי של פעולת האיניציאטור החדשני.<sup>1</sup> ננו-מבנה היברידי של ננו-מוט מוליך-למחצה עם קצה עשוי ננו-חלקיק של זהב. הפרדת המטענים האיכותית הנובעת מהגאומטריה הייחודית של המבנה יוצרת אתרי חמצון-חיזור פעילים המייצרים רדיקלים שבתורם מעודדים תהליכי פלמור במדיום המימי שבו הם נוצרים.

קשר בתהליכי ההתארגנות העצמית - מושגים כמו אנטרופיה וכוחות ואן דר ואלס הם חלק בלתי-נפרד מהתארגנות החלקיקים, והמחקר הזה למעשה יכול להוות גשר בין פרק החובה למבנית הבחירה בהוראת הכימיה ולהפוך את האחרונה לאינטגרטיבית יותר. הנושא גם מציף את ההיבט של התארגנות מערכות ברמות הבנה שונות, הממחיש מאוד בבירור כיצד רמת המקרו והמיקרו קשורות זו בזו.

## ננו-חוטים סופר-הידרופוביים של נחושת הידרוקסיד - אפקט הלוטוס בתוך המעבדה<sup>3</sup>

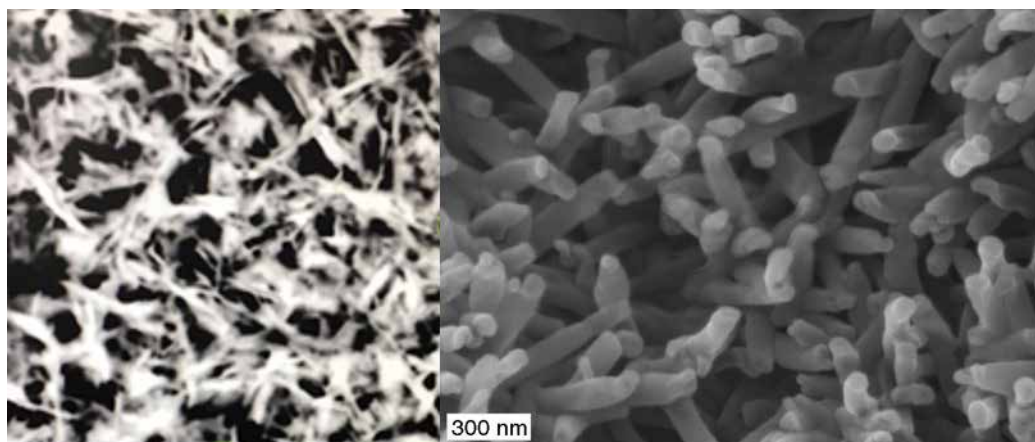
אפקט הלוטוס הוא אולי אחת התופעות המדוברות ביותר והמוכרות ביותר בקרב מורים ותלמידים והינו אחת מההדגמות היפות ביותר להצגת כוחות בין-מולקולריים ברמת המקרו. האפקט מספר את סיפורו של הלוטוס שעליו מכוסים גבשושיות ננומטריות מזעריות (חלקן מוארכות ומחודדות מעט) העשויות חומר שומני והידרופובי. אותן גבשושיות בעלות שטח פנים עצום מונעות מריחה של טיפות מים על העלה, ובמקום זאת, בשל הבדלים במתח הפנים, גורמות להתכדרות כמעט מלאה של טיפות המים, האוספות לכלוך מעל העלה ומתגלגלות מעליו אגב הותרתו יבש לחלוטין. טיפות המים כמעט לא נוגעות במשטח, אלא בעיקר בחלק האווירי שביניהן, ונמנעות מהרטבת העלה.

חיקוי האפקט במעבדה ובתעשייה יהיה צעד בעל משמעויות מרחיקות לכת, שכן הוא יאפשר לממש ייצור של שמשות וחלונות המשתמשים בטכנולוגיה של ניקוי עצמי, וכן יצירה של משטחים המוגנים לגמרי ממים ומהשפעות כימיות ושוחקות של מגעם עם מים. בהקשר של הנושא שלנו, מבט מעמיק אל מבנה הלוטוס מגלה, שוב, שלא רק גודלן של הגבשושיות ולא רק החומר ההידרופובי שממנו הן עשויות אחראים לתופעה שאנו רואים, אלא שגם צורת הגבשושיות נושאת תפקיד חשוב בתפקודן כציפוי הידרופובי. חוקרים מאוניברסיטת בייג'ינג ביצעו תגובה שבה המירו נחושת



מיצג 2: תמונה מוגדלת של הסליל ושל החלקיקים הקובייתיים שמהם הוא מורכב.<sup>2</sup> תמונת מיקרוסקופ אלקטרוני חודר של מיקרו-סלילים העשויים צברים של ננו-חלקיקי מגנטי ריבועיים המאורגנים ספונטנית תחת השפעתו של שדה מגנטי. בתמונה פנימית, האוריינטציה שבה הקוביות יוצרות אינטראקציה הודות לגאומטריה הייחודית המעצימה את האינטראקציות המגנטיות.

**קצת השראה לתלמידים...** המחקר הזה יכול להיות פתח לשיח עם התלמידים (וגם לפרויקטים של הערכה חלופית) בנושא התארגנות עצמית של חומרים ננומטריים ויישומים שלהם. כמו כן בשלב ההוראה של ננו-חלקיקים ומבנה הפסים אפשר לשלב העשרה בנושא תכונות מגנטיות של חומרים כביטוי לתכונה קוואנטית נוספת שאנו כמעט לא נוגעים בה בהוראתנו - הספין של האלקטרון. שמוזכר אף הוא על קצה המזלג בפרק ההוראה הראשון הדין במבנה האלקטרוני של האטום הבודד. תהליכי התארגנות עצמית טומנים בחובם הזדמנות לדיון במאזנים שבין מנועי התהליכים בטבע: אנתרופיה ואנתלפיה. המאזן בין אנתלפיה הנובעת מהאינטראקציות- ואן דר ואלס ומגנטיות, אנתלפיה הנובעת מהסדר המתהווה במערכת הוא חלק בלתי נפרד מהתארגנות החלקיקים. מחקר זה יכול למעשה להוות



מיצג 3: מבנים חד-ממדיים על עלי הלוטוס (מימין) ופס הנחושת (משמאל). שני המשטחים מציגים מבנים הנראים כחוטים (חלקם מחודדים בקצה) בגאומטריה המעצימה את ההידרופוביות המשטח.

התלמידים אחר השינויים. הגדיל לעשות מכון דוידסון לחינוך מדעי ברחובות בהובלתם של פרופ' רון בלונדר ואלה יונאי ותחת ליווי מדעי של פרופ' סטיב וינר, כחלק מפרויקט הדוקטורט של אלה, ושילב בניסוי מדידות מיקרוסקופ אלקטרוני סורק המאפשר לאפיין לעומק את המבנים החוטיים הנומטריים הנוצרים על פני פס הנחושת באופן המעניק רובד טכנולוגי וחשיפה רב-ממדית של התלמידים אל **הניסוי ותוצאותיו. הניסוי כבר תואר בעבר בגיליון 29 של כתב העת "על כימיה"**.<sup>4</sup>

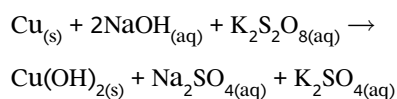
### מדוע פרפרי המורפו כחולים?

החלק הרביעי למאמר זה מוקדש לתופעה מרתקת מעין כמוה - תופעת הצבע הגאומטרי. עוד מהשיעור הראשון במבנית הבחירה של ננו-כימיה, אנו עסוקים בתופעת הצבע ומקורם של צבעים. הצבע הוא מוטיב מרכזי החוזר בכל חלקי ההוראה של הנושא, ובכל אחד מהם מוצג מקור אחר לצבע שאנו רואים בעיניים:

- בפרק הראשון אנו נתקלים בצבע הנובע ממעברים אלקטרוניים בין רמות אטומיות בדידות, בעיקר של יוני מתכות.
  - הפרק השני סוחר את התלמידים אל עולם הצבע של צבענים אורגניים, שם הצבע נובע ממעברים אלקטרוניים בין רמות אנרגיה מולקולריות של מולקולות אורגניות.
  - הפרק השלישי חושף את התלמידים אל עולם הצבע במוליכים-למחצה, שם הוא נובע ממעברים אלקטרוניים בין פסי ההולכה והערכיות שבמוצק.
- בכל אחד מהפרקים מתוודעים התלמידים אל מקור צבע אחר ומתחקים אחר האינטראקציות השונות של חומרים עם קרינה

(Cu) מפס נחושת לננו-חוטם של נחושת הידרוקסיד ( $\text{Cu}(\text{OH})_2$ ). חוטי נחושת הידרוקסיד הם בעלי הידרופוביות מועטה, שאותה אפשר להעצים על ידי ספיחת חומצות שומן על גבי החוטם. בניסוי זה הצליחו החוקרים לחקות הן את הצורה המוארכת והמחודדת של הגבשושיות, על ידי יצירת חוטם ננומטריים עם שטח פנים אדיר, והן את ההידרופוביות המוגדלת, על ידי ציפוי בחומצות שומן. גם כאן, הגאומטריה החד-ממדית (חוטים) של הננו-חוטם הייתה המקור להעצמת ההידרופוביות של פני השטח.

**קצת השראה לתלמידים...** המחקר המוצג כאן אינו מחקר טריוויאלי למבנית הננו-כימיה, במובן זה שאינו מתמקד בנושאים הנקשרים בהכרח לאלו המוצגים במבנית. אולם, וחשוב לזכור זאת, הוא דן במבנים ננומטריים שתהילתם נובעת בעיקר מהגאומטריה שלהם, והוא פלטפורמה נפלאה לייצר פעילות לתלמידים הנקשרת לננו-מבנים כימיים, דווקא דרך מושגים מוכרים שהתלמידים כבר מרגישים נוח איתם, כמו כוחות בין-מולקולריים, הידרופוביות, הידרופיליות, חומרים יוניים ותגובות חמצון-חיזור, שהרי הניסוי ליצירת ננו חוטי נחושת הידרוקסיד הוא ניסוי מוכר העוקב אחר תגובת חמצון-חיזור:



התגובה פשוטה לביצוע ואת התוצר אפשר לבחון בצורה מהנה מאוד לתלמידים, תחת מיקרוסקופ אופטי ומדידת זווית הרטבה של טיפות מים. לאחר טבילת פס הנחושת המחומצן בתמיסת חומצת שומן, ההידרופוביות מועצמת ואפשר לעקוב יחד עם



מיצג 4: תופעת ההתאבכות בכנפי הפרפר. משמאל, תמונת כנפי הפרפר המרהיבות של המורפו הכחול; מימין, תמונה מוגדלת של כנפיו הממחישה את מבנה הכנפיים הנומטרי הייחודי הפועל כמו סריג שמחזיר את האור.

ממשיך להניב לנו החוקרים, לכם המורים ולמרכז העשייה שלכם, הלוא הם התלמידים, מגוון רחב של חומרים ותגליות ברמת הננו שכדאי ורצוי להישאר מעודכנים לגביהם כדי להעשיר דרך קבע את תוכני ההוראה שלנו.

סקירת המבנים והמחקרים שהוצגה כאן מעמידה מאחוריה עולם שלם של תוכן. אני מזמין אתכם לקרוא עוד ולהעמיק את הידע. לחלוק עם התלמידים חלק מהתוכן או את כולו, בתקווה לחשוף אותם לממד הגאומטרי, המוסיף רובד עשיר נוסף לעולם הנדסת החומרים והננו מבנים.

אשמח לסייע בתמיכה מדעית ופדגוגית ככל שיידרש ואני מקווה שתמצאו את המאמר הזה מקור להמון תהליכי למידה חיוביים ומעמיקים עם תלמידיכם!

לשאלות נוספות אתם מוזמנים לפנות אלי במייל:

yarden.daniel@weizmann.ac.il

## מקורות

1. Verbitsky, L.; Waiskopf, N.; Magdassi, S.; Banin, U., A clear solution: semiconductor nanocrystals as photoinitiators in solvent free polymerization. *Nanoscale* 2019, 11 (23), 11209-11216.
2. Singh, G.; Chan, H.; Baskin, A.; Gelman, E.; Repnin, N.; Kral, P.; Klajn, R., Self-assembly of magnetite nanocubes into helical superstructures. *Science* .2014, 345 (6201), 1149-1153
3. Dai, C. A.; Liu, N.; Cao, Y. Z.; Chen, Y. N.; Lu, F.; Feng, L., Fast formation of superhydrophobic octadecylphosphonic acid (ODPA) coating for self-cleaning and oil/water separation. *Soft Matter* **2014**, .10 (40), 8116-8121
4. חנין בשארה, רון בלונדר. שילוב טכניקה חדשנית "ניקוי עצמי", Self cleaning בכיתה יא', כמבנה מארגן של נושאי בסיס בתוכנית הלימודים בכימיה. "על כימיה" 2017, 29, 10-18.
5. Grandcolas, P.; Maurel, M. C., Why are Morpho Blue? *Biodiversity and Evolution* **2018**, 139-174

אלקטרומגנטית. נשאלת השאלה, האם כל צבע טבעי שאנו רואים הוא תוצר של בליעה ומעברים אלקטרוניים בין רמות אנרגיה שונות בחומר?

ובכן, התשובה המוחלטת היא לא. מגוון האינטראקציות שאור יוצר עם חומר מוליד מקורות נוספים שמהם יכול להיווצר הצבע. התחקות אחר כנפי הפרפר מלמדת אותנו רבות על אודות תופעת הצבע המבני. מבט עומק אל כנפי הפרפר מראה שכנפיו עשויות שכבות-שכבות של תעלות וחרירים ננומטריים - שוב אותה גאומטריה יוצאת דופן שמשפיעה על האינטראקציה של החומר עם האור כמעט ללא קשר לאופי החומר עצמו - היוצרים סדרה של סריגי עקיפה. עקיפה היא תופעה פיזיקלית של התאבכות גלים מסדרה של חרירים מזעריים. פרפר מורפו מתברר כמהנדס יוצא דופן, שכן הוא מרכיב בכנפיו את הסריגים הננומטרים הללו. סדרה של החזרות אור מנקודות שונות על סריג העקיפה יוצרת את המחזה היפהפה של כנפיים הצבועות בכחול עמוק, ללא בליעה אפילו של פוטון בודד.

לקריאה נוספת על צבעים מבניים והתעמקות, אני מזמין אתכם [לכתבה הנפלאה של יעל פלדמן מגור וז'אנה אוסיפוב](#) שפורסמה זה מכבר בגיליון 35 של כתב העת על כימיה.

**קצת השראה לתלמידים...** שילוב ההוראה של מבנים ננומטריים טבעיים המתנהגים כסריגי עקיפה בטבע הוא דוגמה להפגנת המולטי-דיסציפלינריות של מקצוע הכימיה. תלמידי פיזיקה יוכלו למצוא עניין בתופעה האופטית המרתקת המתרחשת ברמת הננו ובתוצא (אפקט) שלה - צבע הנולד ממשחק עם התאבכויות של אור. תלמידי ביולוגיה יוכלו לראות את החן בהבנה של תופעה פיזיקלית שיש לה השלכה ביולוגית ותפקיד ברור בחיי הפרפר. ואם לא די בכך, תלמידי כימיה באשר הם שוב מגלים ממד נוסף, שהוא הממד הגאומטרי, המשפיע מאוד על התנהגותם של חומרים ועל האינטראקציה שלהם עם שדות שונים, וכמובן עם אור.

חשיפת התלמידים לתופעה יכולה להיות מקור לפרויקט שבמהלכו מתחקים התלמידים אחר מקורות שונים של צבעים בטבע והקשר שלהם למבנה האלקטרוני של האטום. חוץ מהעניין הרב, אני סבור שזה יסגור להם כמה פינות בתהליך ההוראה שהם עוברים בשלוש שנים במגמה ויגרום להם להסתכל על העולם הסובב אותם ועל המדע כמכלול, באור אחר...

## מספר מילים לסיכום

המאמר מזמין אתכם מורים יקרים, לשאוב השראה, לחבר נקודות וליצור חומרים מעצמכם. המחקר המדעי באוניברסיטאות

