

## ננוכימיה – מן המחקר אל הכיתה

דר' רון בלונדר, המחלקה להוראת המדעים, מכון ויצמן למדע

- הטיפ ועד עולם חכם יותר מאת רונית ברד, אינגה משולם ופאדיה חטיב.
2. הסבר כיצד פועל [מיקרוסקופ כוח אטומי \(AFM\)](#), שבאמצעותו נערך המחקר הנ"ל, מאת נעה קריגר וליאן סלע.
  3. הצעה לפעילות בכיתה בעקבות המאמר: [מודל לעומת מציאות וחשיבות עבודתו של המדען](#), מאת מירב דינור.
  4. המאמר פותח במסגרת הקורס "ננוכימיה – מן המחקר לכיתה", שאני מנחה במסגרת [תכנית רוטשילד-ויצמן](#) לתואר שני בהוראת מדעים במכון ויצמן למדע.

### References:

Gross, L., Mohn, F., Moll, N., Liljeroth, P., Meyer, G. (2009). The Chemical Structure of a Molecule Resolved by Atomic Force Microscopy, *Science*, 325, 1110-1114.

Roco, M. C. (2001). From vision to the implementation of the U.S. national nanotechnology initiative.

*Journal of nanoparticale research*, 3, 5-11.

ננוכימיה וננוטכנולוגיה מהווים תחום מדעי חדש, המאופיין ביכולת ליצור חומרים, התקנים ומערכות בעלי תכונות ושימושים חדשים על ידי עבודה ברמות האטומית, המולקולרית וסופרמולקולרית. תכונות חדשות אלה מהוות בסיס לפיתוח טכנולוגי בתחומים רבים, כגון: אלקטרוניקה, מגנטיות, רפואה, אופטואלקטרוניקה, אנרגיה חלופית ועוד (Roco, 2001).

כיוון שתחום זה חדשני ועדיין נמצא בהתפתחות מתמדת, מרבית מורי הכימיה לא למדו ננוכימיה במהלך לימודיהם האקדמיים. למרות זאת קיים רצון לחשוף תלמידים לנושאים שנמצאים בחזית המחקר ושיכולים לגרות תלמידים לבחור במקצוע הכימיה בתיכון ובלמודים גבוהים. המאמר הבא מתאר מחקר עכשווי שפורסם בחודש אוגוסט 2009 בעיתון *Science*. במחקר מוצגות תוצאות של הדמיית מולקולת פנטאצין בודדת בעזרת מיקרוסקופ כוח אטומי (Gross et al., 2009). על מנת להפוך את המאמר לרלוונטי למורי הכימיה בארץ, אנו מציגים אותו בשלושה חלקים:

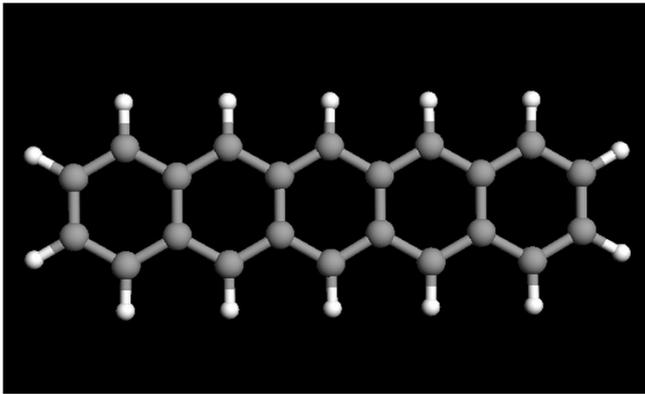
1. עיבוד בעברית של המאמר: [ממולקולת CO יחידה בקצה](#)

# ממולקולת CO יחידה בקצה הטיפ ועד עולם חכם יותר

פאדיה חטיב, אינגה משולם, רונית ברד\*

של גרגר חול. בהדמיה שהתקבלה בניסוי ניתן להבחין בחמש טבעות משובות צמודות של אטומי פחמן, ואף ניתן להבחין בעמדותיהם של אטומי המימן במולקולה. המדענים הצליחו לדייק בפרטים הקשורים לקשרים הקוולנטיים בתוך המולקולה, כגון סדר הקשר ואורך הקשר, ולאפיין את הראקטיביות של אתרים שונים במולקולת הפנטאצין ביחס

המבנה המולקולרי של מולקולת פנטאצין (דגם דו־קמדי) – אטומי הפחמן צבועים באפור, ואטומי המימן בלבן (צילום: IBM)



למולקולת CO שבקצה הטיפ.

מולקולת הפנטאצין נבחרה להדמיה בשל המבנה המישורי שלה, המאפשר היצמדות טובה למשטח הבדיקה וקבלת תוצאות טובות יותר.

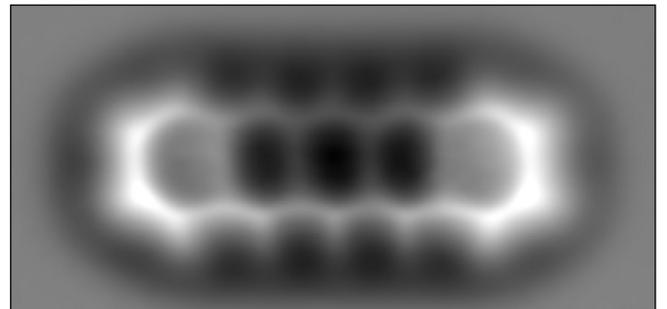
קשיים ומגבלות בהדמיה: על מנת להשיג הדמיה מולקולארית, נדרשו מדעני IBM להגביר את רמת רגישות הטיפ ולהתגבר על המגבלה העיקרית – יכולת הטיפ לתלוש בקלות מולקולות מהמשטח בדומה לאופן ששני מגנטים נמשכים או דוחים זה את זה כאשר הם מתקרבים. למיפוי מוצלח של מולקולה נחקרת, המיקרוסקופ צריך להיות יציב, הן מכנית והן תרמית, וכן יש להבטיח שקצה ה-AFM והמולקולה יישארו ללא שינוי במשך יותר מ-20 שעות.

כדי לאשר את הממצאים ניסיונית, יש לרכוש תובנה כימית לאופיו המדויק של מנגנון ההדמיה במערכת הנבדקת. נמצא כי במערכת זו קיימת דחיית פאולי בין CO לבין מולקולת פנטאצין. מקורו באפקט קוונטי מכני שנקרא עקרון האיסור של פאולי, הקובע כי שני אלקטרונים בעלי ספין זהה אינם יכולים להתמקם באותה רמת אנרגיה.

באוגוסט 2009 התפרסמו תוצאות מחקר שהתבצע בחברת IBM בציריך, שוויץ (Gross et al., 2009).

מדענים מחברת IBM הצליחו לראשונה לפתור מבנה של מולקולת פנטאצין ברמה של אטומים יחידים ברזולוציה חסרת תקדים. לצורך כך השתמשו במיקרוסקופ כוח אטומי במוד פעולה ללא מגע המדידה נעשתה בתנאי ואקום אולטרה גבוה ובטמפרטורה נמוכה ( $-268^{\circ}\text{C}$ ). [המחקר המתואר ע"י מדעני IBM מוצג בסרט הבא.](#)

השפעת מבנה הטיפ על איכות התוצאות: המיוחד בתהליך היה סוג הטיפ של מיקרוסקופ AFM שנבחר לבדיקה. קצה הטיפ היה מולקולת פחמן חד-חמצני - CO. הבדיקה התבצעה בסמיכות למולקולה בגובה של כ-0.5 ננומטר מהמשטח, מה שאפשר למדענים לקבל הדמיה ברזולוציה חסרת תקדים. התבוננות בתוצאות שהתקבלו מעוררת את התחושה כי המדענים השתמשו בזכוכית מגדלת, המדמה אטומים יחידים בתוך מולקולה אחת. סוג כזה של קצה הטיפ (שעשוי ממולקולת CO יחידה) מאפשר יצירה של כוחות זעירים של קצה הטיפ עם המדגם המורכב מענני האלקטרונים של האטומים במולקולת הפנטאצין, וכך מתקבל עמוד השדרה האטומי של מולקולה אחת בדומה לקרני רנטגן העוברות ברקמות רכות ומאפשרות תמונות ברורות של העצמות.



מולקולת פנטאצין (צילום: IBM)

פנטאצין, מולקולה אורגנית מלבנית מישורית המורכבת מ-22 אטומי פחמן ו-14 אטומי מימן. אורך המולקולה 1.4 ננומטר. המרווח בין אטומי פחמן סמוכים הוא רק 0.14 ננומטר (קשר C-C ארומטי) – מרווח קטן פי מיליון מקוטר

\* נכתב במסגרת הקורס: "ננוכימיה מהמחקר לכיתה" בהנחיית דר' רון בלונדר, תכנית רוטשילד-ויצמן, מכון ויצמן למדע.

ויובילו להרחבת הידע האנושי ולדחיפת הגבולות של יכולות הייצור בקנה מידה ננומטרי. הבנת פיזור המטען בסדרי גודל אטומיים תפתח, למשל, את האפשרויות לבניית רכיבי מחשוב קטנים יותר, מהירים, אנרגטיים ויעילים יותר בהשוואה למעבדים ולהתקני הזיכרון של היום. מזעור מערכות ממוחשבות יכול להוביל לכוכב לכת חכם יותר.

**מקורות**

Gross, L., Mohn, F., Moll, N., Liljeroth, P., Meyer, G. (2009). The Chemical Structure of a Molecule Resolved by Atomic Force Microscopy, *Science*, 325, 1110-1114.

**אפליקציות עתידיות למחקר**

אפליקציה אחת היא הדמיה של מולקולות בודדות ברזולוציה אטומית, ע"י חקירה של הטווח הקצר של הכוחות הכימיים ואגב שליטה בקצה הטיפ של המיקרוסקופ עם סיום אטומי שמוגדר היטב, לדוגמה: מולקולת CO. אפליקציה עתידית נוספת מבוססת על קומבינציה של Electrostatic Force Microscopy עם NC-AFM, אשר תוכל לשמש לחקר מעבר של אלקטרון בודד ולחלוקת מטען במערכות מתכתיות בקנה מידה אטומי. תוצאות מחקרים אלו יוכלו להשפיע מאוד על תחום הננוטכנולוגיה, יאפשרו לראות ולטפל באטומים ומולקולות,

# מיקרוסקופ כוח אטומי - AFM

## נעה קריגר וליך סלע\*

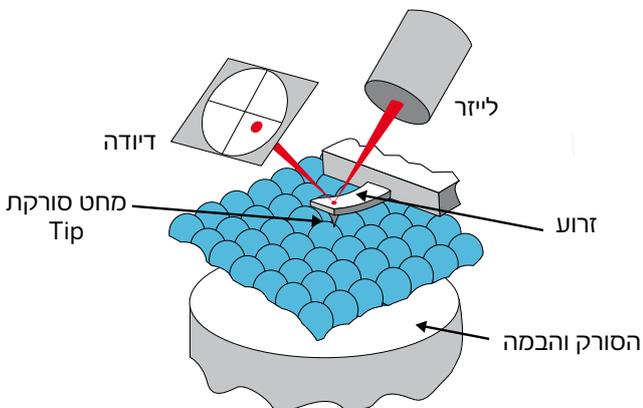
ה-Tip - מחט סורקת: ה-Tip הבא במגע עם הדוגמה עשוי מסיליקון או סיליקון ניטריט, וצורתו פירמידה מרובעת ברוחב של שני מיקרון. הרדיוס של קצה ה-Tip 10 ננומטר (בערך 100 אטומים), איור 3 מציג תמונה של Tip עשוי מסיליקון. ישנן מספר דרישות מה-Tip על מנת שיתפקד היטב: הטיפ צריך להיות חד ודק כדי שיוכל להיכנס לכל השקעים שבדוגמה. דרישה מכנית: שלא יתכוּפף בעת הסריקה על-מנת שנוכל לפרש את התנודות של ה-Tip כתוצאה מאינטראקציה כימית שבין ה-Tip לפני השטח, ולא בגלל כיפוף של ה-Tip. דרישה כימית: יציב לסביבה - שלא תהיה תגובה עם הסביבה הנסרקת.

הזרוע - cantilever: ה-Tip מוחזק ע"י זרוע שהיא גמישה אך חזקה. באורך של 100 מיקרונים וברוחב של מיקרונים בודדים.

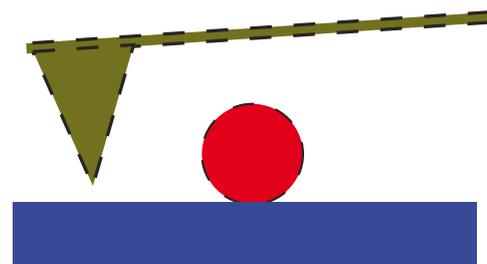
מיקרוסקופ כוח אטומי (Atomic Force Microscope) הנו מיקרוסקופ בעל רזולוציה גבוהה במיוחד, אשר יכולה להגיע עד לננומטרים בודדים. ה-AFM הראשון הומצא בשנת 1986, והוא משמש מאז ככלי יסודי בחקר החומר בסקאלות הננומטריות למטרות דימות ומדידה, הזזה וחיתוך מולקולות ובמיוחד לחקירת פני שטח של חומרים. היתרון הגדול של ה-AFM לעומת ה-STM (שיכול לתת תמונת פני שטח של חומרים שהם מוליכים או מוליכים למחצה), הוא ביכולת לדמות פני שטח של חומרים מסוגים שונים אשר אינם חייבים להוליך זרם חשמלי, למשל: פולימרים, זכוכית וחומרים ביולוגיים.

**מבנה ה-AFM**

ה-AFM כולל את הרכיבים הבאים: מחט דקה - Tip, זרוע cantilever, מערכת משוב הכוללת לייזר, דיודה רגישה לאור ומערכת קבלה ותרגום נתונים, כפי שמתואר באיור 1 (המקשר לאנימציה ברשת) ובאיור 2.



**איור 2** | דגם כללי של AFM המכיל: זרוע (cantilever), חישן-מחט סורקת (Tip), לייזר ודיודה הרגישה לאור שתפקידם לתת משוב וביטוי לסריקה של המחט, מערכת אלקטרוניקה ומחשוב להצגת הסריקה



**איור 1** | המחט הסורקת מוחזקת ע"י הזרוע. סריקה של פני השטח

\* נכתב במסגרת הקורס: "ננוכימיה מהמחקר לכיתה" בהנחיית דר' רון בלונדר, תכנית רוטשילד-ויצמן, מכון ויצמן למדע.

ישנן שתי צורות בסיסיות שבהן פועל ה-AFM: non contact mode ו-contact mode.

**Contact mode** – השיטה הנפוצה ביותר, שבה ה-Tip סורק את פני השטח של הדוגמה ומוסט כאשר הוא עובר מעל המבנים השונים שבפני השטח. המחט מוחזקת ע"י הזרוע (cantilever), ולכן גם הזרוע מוסטת. ההסטה של הזרוע גורמת להסטה של קרן הלייזר המוחזרת, כפי שמוצג באיור 4.

ממיר גובה – התנועות האנכיות של ה-Tip קטנות מאוד – פחות מננומטרים, לכן יש למצוא דרך מתאימה לבדוק ולרשום את השינוי בגובה של הטיפ במהלך הסריקה. ברוב מכשירי ה-AFM, גובה הטיפ נקבע על ידי שימוש בקרן לייזר המוקרנת על צד הזרוע, כפי שמוצג באיורים 2 ו-4. הציפוי של הזרוע עשוי מזהב ומשמש כמראה המחזירה את קרן הלייזר. הקרן המוחזרת פוגעת בפוטו דיודה המזהה את התנועה של הקרן המעידה על תנועת הזרוע והטיפ.

שיטה זו מתאימה להדמיה של פני שטח שטוחים יחסית ברזולוציה גבוהה. השיטה אינה מתאימה לדוגמהות רכות, ולרוב היא גורמת לשחיקה מהירה של המחט, כיוון שהיא נגררת על פני השטח.

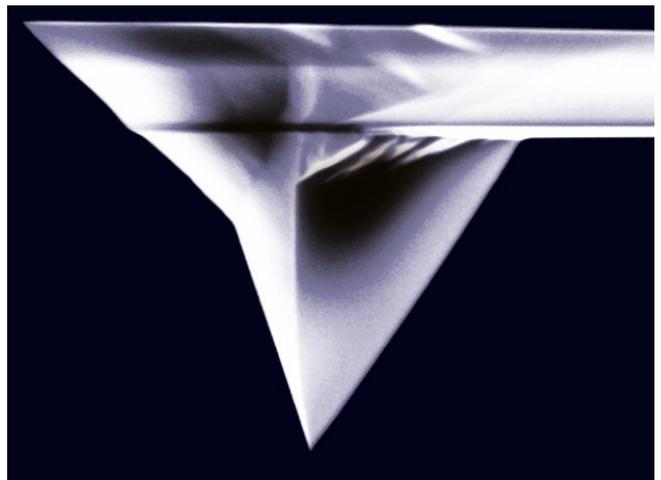
**Non contact mode** – בשיטה זו גורמים לרזוננס על המחט – המחט מתנדדת בתדירות קבועה. כאשר המחט מתקרבת לאטום, נגרם שיכוך של הרזוננס ותדירות התנודה של המחט משתנה. הגלאי מודד את תדירות הרזוננס, ומכיוון ששינוי בתדירות הרזוננס נובע מהירידה בכוח של הזרוע המשקף שינויים ברוח בין המחט לדוגמה, השינוי ברזוננס נותן תמונה – (הדמיה) של חוזק האינטראקציות של המחט עם פני השטח, וניתן לתרגום לטופוגרפיה של פני השטח הנסרק.

בשיטה זו המרחק בין המחט לדגימה נע בין ננומטרים בודדים לעשרות ננומטרים. הכוח שפועל בין המחט לדוגמה נמוך מאוד. הזרוע נוקשה יותר מאשר ב-contact mode, על מנת שהמחט לא תימשך לדוגמה במהלך הסריקה ותבוא במגע עם פני השטח. משתמשים בשיטה זו כאשר הדוגמה רכה או אלסטית, כדי לא להזיז מולקולות הספוחות באינטראקציות חשמליות על פני השטח וגם כדי לא לזהם את הדוגמה במגע עם המחט.

[סרטון על המכשיר](#)

### מקורות

- Planinšič, G., Kovač, P. (2008). Nano goes to school: a teaching model of the atomic force microscope. *Physics Education*, 43(1), 37-45.
- [www.mechmat.caltech.edu/~kaushik/park/1-2-2.htm](http://www.mechmat.caltech.edu/~kaushik/park/1-2-2.htm)
- [nanoscience.com/education/AFM.html](http://nanoscience.com/education/AFM.html)
- [www.weizmann.ac.il/Chemical\\_Research\\_Support/surflab/peter/afmworks/index.html](http://www.weizmann.ac.il/Chemical_Research_Support/surflab/peter/afmworks/index.html)
- [www.youtube.com/watch?v=87BQIFCk9s](http://www.youtube.com/watch?v=87BQIFCk9s)

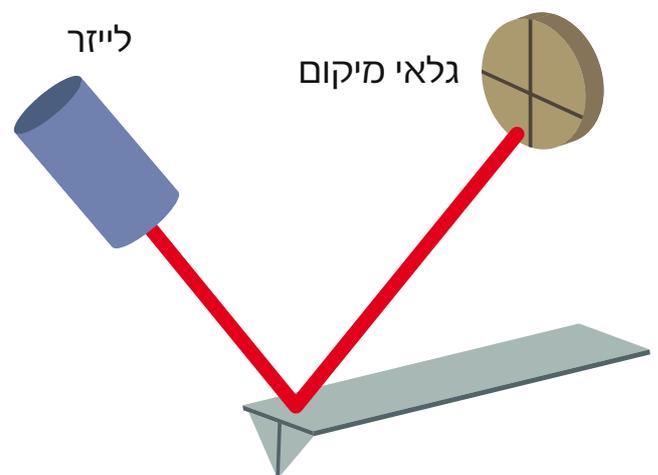


איור 3 | Tip עשוי סיליקון

### אופן הפעולה של ה-AFM

עקרון הפעולה של ה-AFM מבוסס על כוחות הון-דרלוס הנוצרים בין ה-Tip לאטומים שעל פני השטח של הדגימה גורמים לתנודות של ה-Tip. תנודות אלו מאפשרות את מדידת הטופוגרפיה של דוגמה לא מוליכה. ישנן שתי דרכים לסריקה:

1. ה-Tip נשאר במקום ומזיזים את הדוגמה.
  2. הדוגמה קבועה, וה-Tip זז.
- במקרה הראשון הדוגמה מונחת על גביש פיזואלקטרי (גביש שמשנה את אורכו בממדים ננומטריים בעקבות שינויים במתח חשמלי חיצוני). הגביש יוצר מתח כאשר מופעל עליו לחץ ולהפך – הוא יוצר לחץ ע"י כיווץ או התרחבות שלו כאשר מופעל עליו מתח, וכך הדוגמה יכולה לזוז בסקלה של ננומטרים. תנועות עדינות אלו לא היו מתאפשרות בשיטות מכניות רגילות. במקרה השני, כאשר מדובר על דוגמה גדולה או נוזל, נוח יותר שה-Tip הוא זה שזוז, ולכן ממקמים אותו על גביש פיזואלקטרי.



איור 4 | הלייזר מוסט בעקבות עלייה וירידה של המחט והזרוע. מיקום קרן הלייזר המוסטת נקראת ע"י גלאי

\*נכתב במסגרת הקורס: "ננוכימיה מהמחקר לכיתה" בהנחיית דר' רון בלונדר, תכנית רוטשילד-ויצמן, מכון ויצמן למדע.

# AFM העברה לשדה החינוכי

## דף למורים - הצעה לפעילות בנושא מודל לעומת מציאות וחשיבות עבודתם של המדענים

### מירב דינור\*

#### פעילות מספר 2

- תמונות 1, ו-2 מציגות את המולקולה פנטאצין (Pentacene). שאלות לדיון בכיתה:
- איזו תמונה לדעתכם מדויקת יותר?
  - מהו ההבדל העקרוני בין שתי התמונות?
  - מה עוד הייתם רוצים לדעת על כל אחת מהתמונות?
  - חשבו מדוע לדעתכם מתאמצים המדענים בפיתוח של מיקרוסקופים חדשים ומשוכללים כאשר ניתן להשתמש במודל? מהם החסרונות בשימוש בחוש הראייה בלבד?
  - תשובה אפשרית: כושר הפרדה מוגבל: לא ניתן להפריד בין 2 נקודות קטנות מאוד, לא ניתן להפריד בין שתי נקודות קרובות מאוד.
  - מהם החסרונות בשימוש במיקרוסקופ ה-AFM? תשובה אפשרית: המיקרוסקופ אינו נותן תמונה, אלא הדמיה בלבד, בדומה להבדל בין "תמונות" האולטרה סאונד לבין תמונת תינוק.

#### מטרות הפעילות

- הבנת מגבלותיו של מודל
- הבנת תפקיד ההדמיות באישוש נכונותו של מודל המבנה המולקולרי
- הכרת הקשיים העומדים בפני המדענים בבואם לדמות מולקולה; העלאת השאלה - מה צופן העתיד?
- הרכבת 2-3 משפטים מרכזיים מתוך הדיון המסכם - משפטים שניתן יהיה לתלות אותם במעבדה.

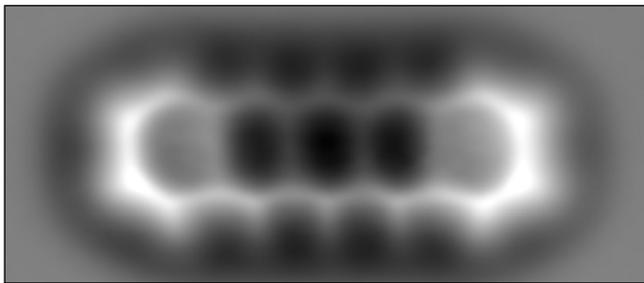
#### מבנה השיעור

- דיון כיתתי בעקבות שאלות מגרות חשיבה
- ניתוח מאמר מדעי
- דיון מסכם בעקבות השאלות האחרונות הכולל גם את תחושות התלמידים.

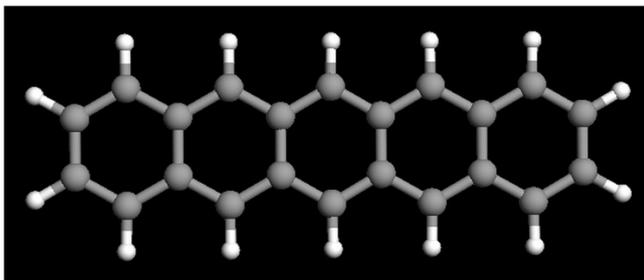
#### פעילות מספר 1

##### ציירו עלה

- האם אתם בטוחים שהציור מתאר עלה נאמנה?
- כיצד אתם יודעים זאת?
- ציירו מולקולה של מים -  $H_2O$
- האם אתה בטוח שהציור מתאר נכון מולקולת מים?
- כיצד אתה יודע זאת?



1 - צילום: IBM



2 - צילום: IBM

\* נכתב במסגרת הקורס: "ננוכימיה מהמחקר לכיתה" בהנחיית דר' רון בלונדר, תכנית רוטשילד-ויצמן, מכון ויצמן למדע.

## AFM - ניסוי שבדק מודל

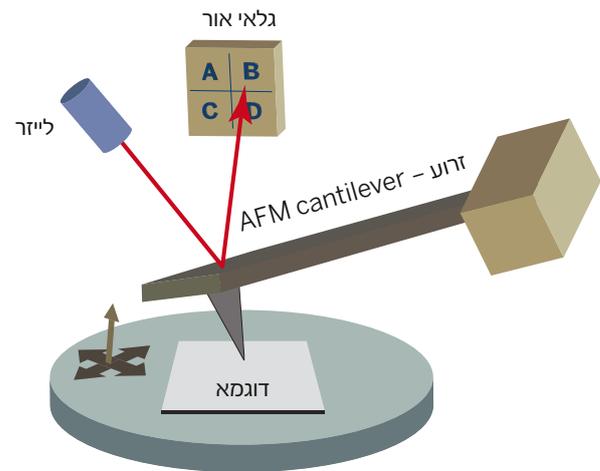
**פעילות 3 - קריאת קטע מתוך המאמר המדעי ואחריו שאלות.**  
להדמיית המבנה הכימי של מולקולת pentacene בודדת השתמשו המדענים במיקרוסקופ ה-AFM בתנאים מיוחדים: ואקום אולטרה גבוה ובטמפרטורה נמוכה ( $-268^{\circ}\text{C}$ ). מבעד לענן אלקטרוני הצליחו המדענים לראות באמצעות ה-AFM עמוד שדרה אטומי של מולקולה יחידה. בדומה לקרני רנטגן העוברות ברקמות רכות ומאפשרות תמונות ברורות של העצמות.

הטיפ שהתקרב מדי. קצה הטיפ שנבחר כמתאים הוא מולקולת פחמן חד-חמצני (CO) אשר הניב ניגוד אופטימלי בגובה קצה של כ-0.5 ננומטר והתנהג כמו זכוכית מגדלת חזקה המדמה אטומים יחידים בתוך מולקולת פנטאצין וחשף את המבנה הכימי האטומי המדויק.  
מקור המאמר:

Gross, L., Mohn, F., Moll, N., Liljeroth, P., Meyer, G. (2009). The Chemical Structure of a Molecule Resolved by Atomic Force Microscopy, *Science*, 325, 1110-1114.

### שאלות בעקבות קריאת המאמר

1. תארו את עבודת החוקרים (תנאי העבודה, דרך העבודה, החומרים שבהם משתמשים) ואת מטרתם.
2. באילו קשיים נתקלו החוקרים?
3. הביאו מתוך הקטע 2 ציטוטים שממחישים את סדרי הגודל שבהם עובדים החוקרים.
4. כיצד לדעתכם נוצרים כוחות בין המולקולות לחיישן? מה במבנה המולקולות ובהרכב האטומים מאפשר את יצירתם של כוחות אלה?
5. כיצד שינוי במבנה המולקולה עשוי לשנות את תנודות החיישן ולהביא לקבלת תמונה מתאימה למולקולה?



### שאלות לדין מסכם

- האם הגילוי במאמר הוא סוף הדרך לדעתכם? נמקו.
- לו הייתם מדענים, מה הייתם ממשיכים לחקור?

### תודות

תמונות IBM מפורסמות באישור:

Mr. Sciacca, Manager, Communications,  
IBM Research – Zurich

### הטיפ שעשה את העבודה

פעולת ה-AFM מבוססת על טיפ מתכת חד. קצה הטיפ יוצר כוחות חלשים עם הדוגמה (למשל, מולקולה בודדת), ומתאפשרת הדמיה של תמונה. בניסויים הנוכחיים הייתה המולקולה שנחקרה פנטאצין pentacene. פנטאצין היא מולקולה אורגנית מלבנית מישורית. המורכבת מ-22 אטומי פחמן ו-14 אטומי מימן. אורך המולקולה 1.4 ננומטר. המרווח בין אטומי פחמן סמוכים הוא רק 0.14 ננומטרים (קשר C-C ארומטי) – גודל זה קטן פי מיליון מקוטר של גרגר חול. בהדמיה שהתקבלה בניסוי ניתן להבחין בחמש טבעות משושות צמודות של אטומי פחמן ואף ניתן להבחין בעמדותיהם של אטומי המימן במולקולה ובקשרים הכימיים בין האטומים. "המפתח להשגת רזולוציה אטומית היה חדות אטומית של קצה טיפ ויציבות גבוהה מאוד של המערכת" אמר מדען IBM ליאו גרוס. על מנת לקבל הדמיה של מבנה כימי של מולקולה עם AFM, הכרחי לעבוד בסמיכות קרובה מאוד למולקולה כי הטווח שבו אינטראקציות כימיות משמעותיות הוא פחות מננומטר. על מנת להשיג הדמיה מולקולרית, מדעני IBM נדרשו להגביר את רמת רגישות הטיפ ולהתגבר על המגבלה העיקרית: עזיבה של מולקולות את משטח הבדיקה. בדומה לאופן שבו שני מגנטים נמשכים או דוחים זה את זה כאשר הם מתקרבים, כך כלול מולקולות הפנטאצין להיתלש בקלות ולהימשך אל קצה