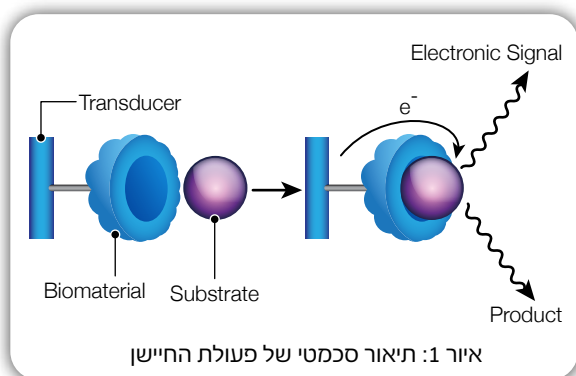


מכונות מולקולריות: הכימיה מאחורי פרס נובל 2016

פרופ' רון בלוונדר, ראש קבוצת הכימיה במחלקה להוראת המדעים

באיור זה האות החיצוני שנכנס למערכת הוא נוכחות של סובסטרט, והמערכת מגיבה ביצירת סיגנל חשמלי המעיד על קישור הסובסטרט לחיישן.



המערכות שפותחו על ידי שלושת זוכי פרס נובל פועלות באופן דומה. הן מקבלות אות חיצוני אשר גורם למערכת לבצע תנועה מוגדרת. במערכות אלה האות אשר נכנס

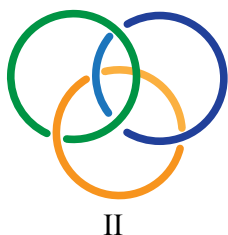
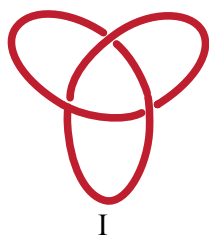
בשנת 2016 זכו יחד שלושה מדענים בפרס נובל בכימיה על תרומתם לעיצוב וסינתזה של מכונות מולקולריות. השלושה - ז'אן פייר סובאז' (Sauvage) מאוניברסיטת שטרסבורג בצרפת, ג'יי פרייזר סטודארט (Stoddart) מאוניברסיטת נורת'ווסטרן בארה"ב וברנארד פרינחה (Feringa) מאוניברסיטת חרונינגן בהולנד - עבדו במקביל במחקר לקידום התחום, ולכל אחד מהם תרומה ייחודית שהפכה, ולו במעבדת המחקר, את המכונות המולקולריות מרעיון למציאות.

מכונה מולקולרית נוצרת על ידי התארגנות של מספר מסוים של מולקולות ויכולה לעשות פעולה מוגדרת (output) בתגובה לסיגנל (אות) חיצוני מסוים (input). כדי להבין את המשמעות של ההגדרה אתיחס למאמר שכתבתי יחד עם מורות מובילות לכימיה, ובו תיארנו את האופן שבו חיישן מולקולרי עובד. http://chemcenter.weizmann.ac.il/_Uploads/dbsArticles/1089.pdf?SearchParam

למערכת הוא בדרך כלל אנרגיה חיצונית מוגדרת, וכתוצאה ממנו המערכת המולקולרית מבצעת תנועה, ולכן המערכת מכונה "מכונה מולקולרית" או "ננורובוט".

במטרה לייצר מכונות בסקלה מולקולרית, נדרשו החוקרים לעמוד באתגרים האלה:

- לתכנן ולהכין (לסנתז) את המרכיבים המולקולריים של המכונה;
- לשלוט באופן שבו המרכיבים המולקולריים מתארגנים באופן הרצוי;
- לשלוט בדיוקנות בתנועה היחסית של מרכיבי המכונה;
- להתגבר על התנועה הבראונית שהיא מסדר גודל של תנועת המכונה המולקולרית;
- לצרוך אנרגיה ממקור חיצוני (כגון אור) כדי להוציא את המערכת משיווי משקל ולגרום לה לנוע.

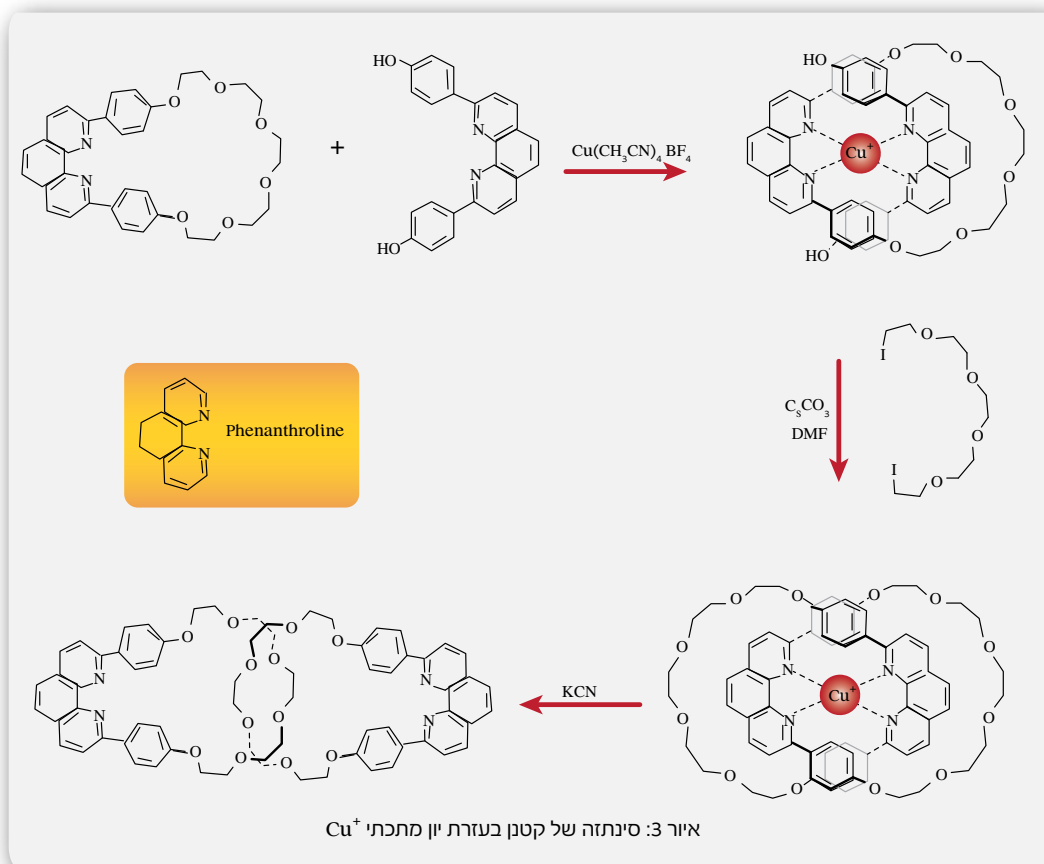


ז'אן פייר סובאז' הצליח לסנתז טבעות שלובות, המכונות קטננים*. אלו הם מבנים מולקולריים בעלי ארכיטקטורה של שתי טבעות (או יותר) אשר שלובות זו בזו. הטבעות השלובות אינן יכולות להיפרד ללא שבירה של קשר קוולנטי, כמוצג באיור 2.

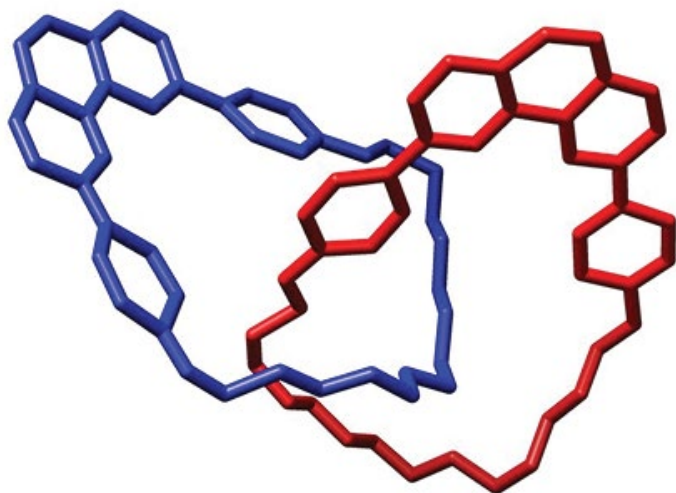
איור 2: שלוש אפשרויות של ארכיטקטורה מולקולרית של טבעות שלובות אשר אינן יכולות להיפרד זו מזו ללא שבירה של קשר קוולנטי

הוא פיתח סינתזה של קטננים באמצעות קורדינציה עם יון נחושת, אשר מקבע מבנה

מסוים לסגירת טבעת באמצעות יון נחושת. בשלב השני של הסינתזה מתבצעת סגירה של קשר קוולנטי אשר סוגרת את הטבעת במבנה שבו היא נקשרה ליון הנחושת, כפי שמוצג באופן מפורט באיור 3.



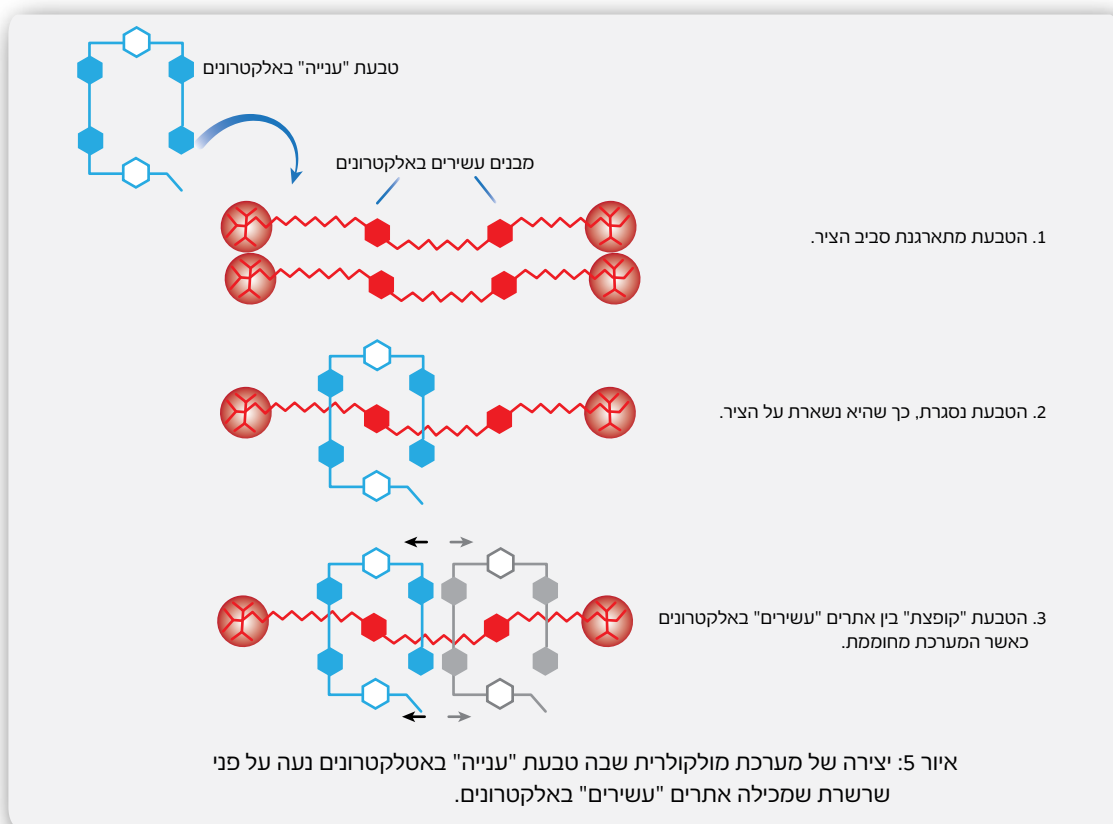
* השם קטנן מבוסס על המילה הלטינית catena אשר פרושה שרשרת.



איור 4: הטבעות השלובות של סובאז' | מקור: ויקיפדיה

הטבעות השלובות שיצר ז'אן פייר סובאז' יכולות לעבור שינוי מבני הפיך בסדר גודל של 9 אנגסטרומ, אשר נוצר בעקבות יצירה ופירוק קומפלקס עם CuI. הישג זה היווה את הצעד הראשון לקראת מכונה מולקולרית - כיוון שקיבלנו מערכת שבה חלק אחד יכול לנוע לכיוון חלק אחר במערכת. עם קצת דמיון אפשר לראות מדוע כונה ההישג הזה הבסיס לשריר מלאכותי.

במקביל לעבודה זו עבד ג'יי פרייזר מסטודארט באנגליה על דרך אחרת לקבלת תנועה נשלטת ברמה מולקולרית. הוא מיקם את הטבעת באמצעות קישור בין-מולקולרי המבוסס על קומפקסציה בין מולקולה עשירה באלקטרונים למולקולה אחרת אשר יש בה אזורים עניים באלקטרונים, כמוצג באיור 5.



לאחר מיקום הטבעת החיצונית הענייה באלקטרונים סביב מולקולת הציר העשירה באלקטרונים מתבצעת סגירה קוולנטית של הטבעת. בהוספת חום למערכת מתקיימת תנועה של המבנה הטבעתי לאורך הציר. אבל לא ניתן לשלוט במיקום של הטבעת, והתנועה המתקבלת היא תנועה אקראית בראונית.

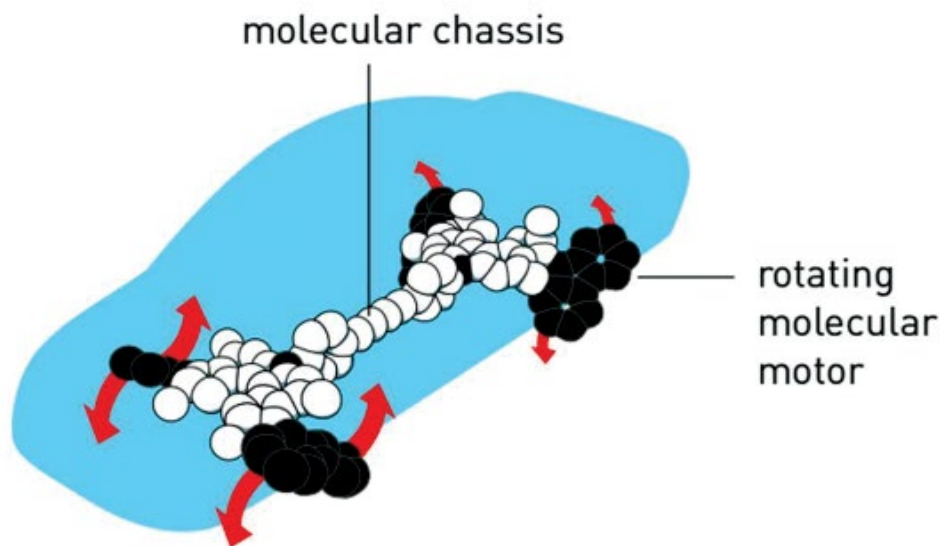
בשנת 1994 הצליחו שתי הקבוצות לשלוט בתנועה של המבנים המולקולריים באמצעות סיגנל חיצוני מחזורי של: שינוי pH ושינוי פוטנציאל חמצון-חיזור. ניתן לשלוט במיקום של המולקולה הטבעתית, ואם נסובב את הציר לאורכו, תנועת המולקולה ב-90 מעלות. נוכל לדמיין מעלית מולקולרית קטנה אשר עולה ויורדת ויכולה לעצור בכל קומה, כפי שמוצג [באיור 7 בקישור זה](#).

התרומה של ברנארד פרינחה ההולנדי התמקדה בפיתוח מנועים מולקולריים, על ידי שימוש באיזומריזציה סביב קשרים כפולים. [באיור 8 המופיע בקישור זה](#) ניתן לראות איזומריזציה מחזורית והפיכה סביב קשרים כפולים אשר מאפשרת תנועה מעגלית ברמת המיקרו וזו מתורגמת לתנועה מעגלית ברמת המאקרו.

סינגל חיצוני של אור באורך גל מסוים מוביל לתגובה תוך-מולקולרית של איזומריזציה אשר משתנה עם סינגל חיצוני נוסף של חום. כאשר חוזרים באופן מעגלי על האותות הללו של אור וחום מתקיים מעבר סיבובי מחזורי של המבנה המולקולרי אשר יוצר תנועה מעגלית של המולקולה.

כאשר הצליחו לקבע את המנועים המולקולריים הסיבוביים הללו לננו-חלקיקים אשר נמצאו בתוך נוזל צמיג, הצליחו להניע באופן סיבובי מוט קטן שצף על פני הנוזל. כפי שניתן לראות [בסרטון](#).

מולקולה אשר מסתובבת באופן מבוקר על ידי איזומריזציה מחזורית מצליחה לייצר תנועה בסדר גודל מאקרוסקופי! בעיני זה הישג מדהים! החוקרים דימו את היכולת של המולקולה לייצר תנועה מעגלית מחזורית לגלגל הנע סביב ציר, ולכן הגיעו להישג של ייצור המכונת המולקולרית, כפי שניתן לראות באיור 6.



איור 6: התזוזה של המכונת מולקולרית מתאפשרת באמצעות התגובה האיזומריזציה מעגלית
Johan Jarnestad/The Royal Swedish Academy of Sciences: איור: המכונת המולקולרית של פרינחה ועמיתיו.

ומה הלאה?

חשוב לציין שההישגים של זוכי פרס הנובל שתוארו במאמר זה נמצאים עדיין בשלבים של מחקר במעבדה. עדיין אין עולים במעלית שהוצגה, אין נוסעים במכונת המולקולרית וגם אין מניעים איברים על ידי השריר המולקולרי, אבל הפיתוחים של המחקרים שהוצגו ושהובילו לקבלת פרס נובל מהווים ארגז כלים לבנייה של מכונות מולקולריות. החוקרים הצליחו להפר שיווי משקל במערכות כימיות תוך כדי שימוש באנרגיה חיצונית, בדומה למולקולות ביולוגיות אשר משתמשות באנרגיה כדי לבצע תגובות כימיות. חשוב לזכור כי גם קיומם של יצורים חיים נמצא מחוץ לשיווי משקל תרמודינמי, כך שאולי המחקרים הללו מהווים צעד נוסף של המדע בניסיון לחקות את המכונה המולקולרית החכמה ביותר שהומצאה ומכונה "חיים".

מקורות

Cesario, M.; Dietrich-Buchecker, C.; Guilhem, J.; Pascard, C.; Sauvage, J.-P. Molecular Structure of a Catenand and Its Copper(I) Catenate: Complete Rearrangement of the Interlocked Macrocyclic Ligands by Complexation. *J. Chem. Soc. Chem. Commun.* **1985**, 244–247.

Anelli, P. L.; Spencer, N.; Stoddart, J. F. A Molecular Shuttle. *J. Am. Chem. Soc.* **1991**, 113 (13), 5131–5133.

Shirai, Y.; Osgood, A. J.; Zhao, Y. M.; Kelly, K. F.; Tour, J. M. Directional Control in Thermally Driven Single-Molecule Nanocars. *Nano Lett.* **2005**, 5 (11), 2330–2334.

