

10 חידות בלתי פתורות בכימיה*

פיליפ בול*

האתגר עכשיו הוא למצוא דרך לבחון את הרעיונות האלה באמצעות תגובות שיתרחשו לאטן במבחנות. חוקרים הדגימו, למשל, כיצד כמה כימיקלים פשוטים באופן יחסי יכולים להגיב זה עם זה באופן ספונטני וליצור אבני בניין מסובכות יותר של מערכות חיות. אבני הבניין האלה, חומצות אמיניות ונוקלאוטידים, הן היחידות הבסיסיות של דנ"א ורנ"א. ב-2009 הצליח צוות בראשותו של ג'ון סת'רלנד, הפועל כיום במעבדת MRC לביולוגיה מולקולרית בקיימברידג' שבאנגליה, להדגים את יצירתם של נוקלאוטידים ממולקולות שסביר להניח שהיו מצויות במרק הקדמוני.

חוקרים אחרים התמקדו ביכולתם של גדילי רנ"א מסוימים לפעול כאנזימים וזאת כדי למצוא ראיות שיתמכו בהשערת עולם הרנ"א. באמצעות צעדים כאלה, מדענים מקווים לגשר בהדרגה על הפער שבין חומר דומם לבין מערכות בנות קיימא המסוגלות לשכפל את עצמן.

עכשיו, כשמדענים מיטיבים להכיר סביבות מוזרות ואולי אף פוריות במערכת השמש שלנו, כמו זרמי המים המופיעים לפרקים על מאדים, אגמי הפטרו-כימיקלים על טיטן, ירחו של שבתאי, והאוקיינוסים המלוחים המסתתרים כנראה מתחת לקרח המכסה את ירחי צדק, אירופה וגנימד, נעשית שאלת מקור החיים על כדור הארץ רק אחת ממכלול שאלות רחב יותר: באילו נסיבות יכולים חיים להתעורר? ועד כמה רחב יכול להיות הבסיס הכימי לחיים? ב-16 השנים האחרונות התגלו יותר מ-500 כוכבי לכת המקיפים שמשות אחרות מחוץ למערכת השמש שלנו, עולמות בעלי מגוון מהמם, וגילויים מעשיר את הנושא המחקרי הזה.

התגליות האלה דחפו את הכימאים להפליג בדמיונם מעבר לכימיה אחת של החיים. סוכנות החלל האמריקנית נאס"א,

רבות מן השאלות המדעיות המהותיות ביותר וכמה מבעיותיה הבערות ביותר של האנושות קשורות למדע האטומים והמולקולות



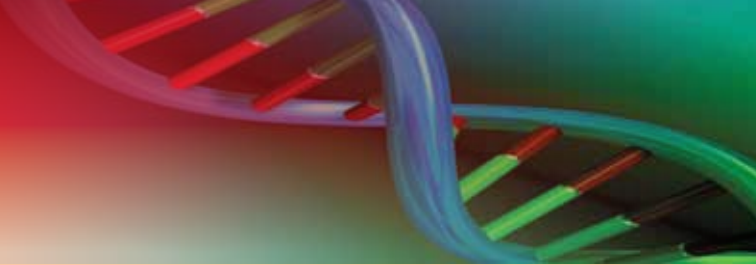
1. כיצד החלו החיים

הרגע שבו הגיח היצור החי הראשון מן החומר הדומם, לפני כמעט ארבעה מיליארדי שנה, עדיין אפוף מסתורין. כיצד הצליחו המולקולות הפשוטות, באופן יחסי, של המרק הקדמוני ליצור תרכובות מורכבות יותר ויותר? וכיצד החלו כמה מן התרכובות האלה לעבד אנרגיה ולהשתכפל (שניים ממאפייני החיים)? ברמה המולקולרית, כל השלבים האלה הם כמובן תגובות כימיות, ולכן, השאלה כיצד החלו החיים היא שאלה כימית.

הכימאים אינם יכולים להסתפק עוד בתרחישים המתקבלים אך בקושי על הדעת - וכאלה יש רבים. חוקרים שיערו, למשל, שמינרלים מסוימים, כמו חרסית, שימשו כזרזים ליצירת הפולימרים הראשונים בעלי כושר שכפול עצמי (פולימרים, כמו דנ"א (DNA) או חלבונים, הם שרשרות מולקולריות של יחידות קטנות יותר); או שארובות הידרו-תרמיות בקרקעית הים הן שסיפקו את האנרגיה שהניעה את היווצרותה של המורכבות הכימית. יש גם השערות על אודות "עולם הרנ"א", שבו מולקולות רנ"א (RNA), הדומות לדנ"א ופועלות גם כאנזימים המזרזים תגובות כימיות כמו שחלבונים עושים, שימשו כמולקולות אוניברסליות שקדמו לדנ"א ולחלבונים.

* המאמר פורסם לראשונה בסיינטיפיק אמריקן ישראל, גיליון דצמבר 2011 בהוצאת אורט ישראל

* פיליפ בול (Ball) בעל תואר דוקטור לפיזיקה מאוניברסיטת בריסטול באנגליה כיהן במשך יותר מ-20 שנה כעורך כתב העת Nature הוא מחבר עטור פרסים של 15 ספרים, ובהם "אינסטינקט המוזיקה: כיצד פועלת המוזיקה ומדוע איננו יכולים לחיות בלעדיה."



היא שאין הסכמה בין המדענים מה אמור להיות הייצוג המדויק יותר של מולקולות.

בשנת 1920 הראו הפיזיקאים וולטר הייטלר ופריץ לונדון כי אפשר לתאר את הקשר הכימי באמצעות משוואותיה של תורת הקוונטים, תורה שהייתה אז בחיתוליה. הכימאי האמריקני הדגול לינוס פאולינג הציע את הרעיון שקשרים נוצרים כשאורביטלים אלקטרוניים של אטומים שונים חופפים זה לזה במרחב. תיאוריה מתחרה של רוברט מיליקן ופרידריך הונד הציעה שקשרים נוצרים כתוצאה מהתמזגותם של אורביטלים אטומיים ליצירת "אורביטלים מולקולריים" המשתרעים על פני יותר מאטום אחד. היה נראה שהכימיה התיאורטית עומדת להיעשות ענף של הפיזיקה.

כמעט 100 שנה לאחר מכן התקבלה תמונת האורביטלים המולקולריים כמעט לגמרי, אבל עדיין לא כל הכימאים משוכנעים שבכל המקרים זו הדרך הטובה ביותר לתאר מולקולות. הסיבה לכך היא שמודל זה של המולקולות ודומיו מבוססים על הנחות מְפֹשְטוֹת ולכן הם רק תיאורים מקורבים וחלקיים. במציאות, מולקולה היא צרור של גרעיני אטומים המוקפת בענן אלקטרונים שבתוכה מתקיימות ללא הרף "תחרויות משיכת חבל" בין כוחות חשמליים מנוגדים ובין תנועה והתארגנות מחדש של מרכיביה. המודלים הנוכחיים של המולקולה, המנסים בדרך כלל להקפיד את הישות הדינמית הזאת לכדי ישות סטטית, לוכדים אולי כמה מתכונותיה הבולטות, אבל מזניחים תכונות אחרות.

תורת הקוונטים אינה מסוגלת לספק הגדרה חד-משמעית של הקשרים הכימיים העולה בקנה אחד עם האינטואיציה של כימאים שלחם-חוקם הוא לבנות ולשבור את הקשרים האלה. יש כיום דרכים רבות לתאר מולקולות כאטומים הקשורים זה לזה בקשרים. לדברי הכימאי הקוונטי דומיניק מרקס מאוניברסיטת חבל הרוֹרֶר בבוכום שבגרמניה, רובם תיאורים "שימושיים במקרים מסוימים, אך נכשלים באחרים."

למשל, סברה במשך שנים כי מים נוזלים הם תנאי מקדים לחיים. עתה יש מדענים שאינם בטוחים בכך עוד. מה בדבר אמוניה נוזלית, או פֶּרְמֶאמיד, או ממס שמנוני כמו מֶתָאן נוזלי, או מימן נוזלי בתנאים הסופר-קריטיים של צדק? ומדוע שהחיים יגבילו את עצמם לדנ"א, לרנ"א ולחלבונים? ככלות הכול, מדענים כבר יצרו כמה מערכות כימיות מלאכותיות המציגות סוג של שכפול באמצעות החלקים המרכיבים אותן בלי להסתמך על חומצות גרעין. נראה שכל מה שצריך לשם כך זאת מערכת כימית המסוגלת לשמש כתבנית ליצירת עותק ואז להתנתק.



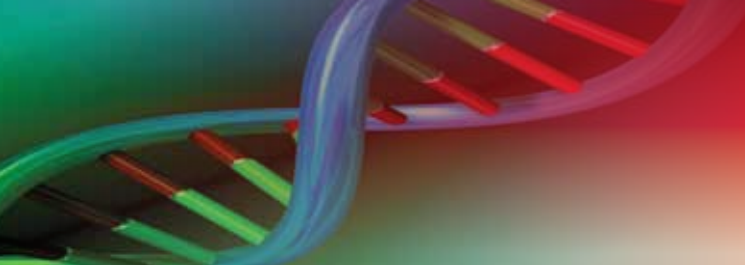
מתוך התבוננות בחיים על כדור הארץ "אין ביכולתנו להחליט אם קווי הדמיון [כמו השימוש בדנ"א ובחלבונים] בין היצורים החיים משקפים מוצא משותף או את הצרכים האוניברסליים של החיים," אומר הכימאי סטיבן

בנר מן המוסד לאבולוציה מולקולרית יישומית בגיינסוויל שבפלורידה. אבל אם נתבצר בעמדה שיש לדבוק רק במוֹכֵר, "זה לא יהיה כיף."



2. כיצד נוצרות מולקולות

המבנים המולקולריים הם אולי עמוד התווך של שיעורי המדע בבית הספר התיכון, אבל התמונה המוכרת של כדורים ומקלות המייצגים את האטומים ואת הקשרים המחברים ביניהם היא בעיקרה סיפור בדים מקובל. הבעיה



אינם משתקים גנים באופן קבוע ואין הם שומרים במצב המתנה רק את הגנים שהם זקוקים להם. במקום זאת, הגנים שכבו שומרים על כושר פעולה רדום, כלומר שומרים על יכולתם לייצר את החלבונים שהם מקודדים, והם עשויים להיות מופעלים מחדש, למשל בעקבות חשיפה לכימיקלים מסוימים המגיעים מן הסביבה.

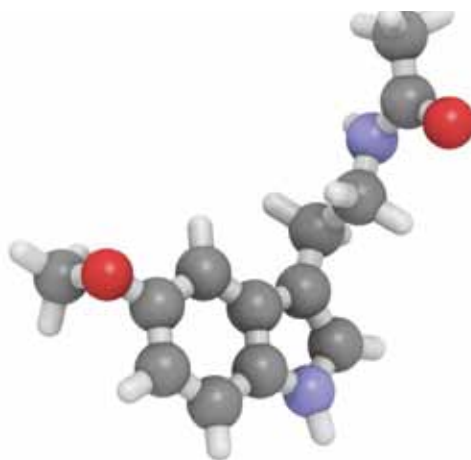
הדבר המרגש והמאתגר את הכימאים הוא שבקרת הגנים הזאת קשורה כנראה לאירועים כימיים בקנה מידה גדול יותר מזה של אטומים ומולקולות, בתחום ביניים (mesoscale), שבו פועלים מבנים מולקולריים גדולים וקבוצות גדולות של מולקולות. כרומטין, החומר המרכיב את הכרומוזומים מדנ"א ומחלבונים, בנוי במבנה היררכי. הסליל הכפול של הדנ"א כרוך סביב חלקיקים גליליים המורכבים מחלבונים הקרויים היסטונים. שרשרת החרוזים הזאת ארוזה אף היא במבנים בעלי סדר גבוה יותר שאנו ממעטים להבינם. בתאים מתקיימת בקרה הדוקה על המארג הזה. האופן והמקום שבו ארוז גן מסוים בתוך הכרומטין עשויים לקבוע אם הגן פעיל או לא.

בתאים פועלים אנזימים ייעודיים הקובעים את צורתו המשתנה של הכרומטין. לאנזימים האלה יש תפקיד מרכזי בתהליך ההתמיינות של התא. נראה שלכרומטין בתאי גזע עוברים יש מבנה משוחרר ופתוח יותר. כשגנים מסוימים מושתקים, הכרומטין נעשה גושי יותר ומאורגן. "נראה שהכרומטין מקבע ומשמר, או מייצב את התאים," אומר הפתולוג ברדלי ברנשטיין מבית החולים הכללי של מסצ'וסטס.

זאת ועוד, בעיצוב הכרומטין מעורבים שינויים כימיים של הדנ"א ושל ההיסטונים. מולקולות קטנות מוצמדות להם ומשמשות כתוויות. הן מסמנות למנגנון התאי להשתק

הדמיות מחשב מסוגלות כיום לחשב בדיוק רב מבנה ותכונות של מולקולות מתוך עקרונות קוונטיים ראשוניים-כל עוד מספר האלקטרונים קטן דיו. "באמצעות כימיה חישובית אפשר להגיע לדרגות גבוהות מאוד של מציאותיות ומורכבות," אומר מרקס. כתוצאה מכך, אפשר לראות בחישובי המחשב כעין ניסוי וירטואלי שבאמצעותו אפשר לחזות את מהלכה של תגובה כימית. אבל ברע שההדמיה עוסקת בתגובה שבה מעורבים יותר מכמה

עשרות אלקטרונים, כמות החישובים מתחילה להכריע עד מהרה אפילו את מחשבי-העל החזקים ביותר. האתגר היום הוא אפוא לראות אם אפשר להרחיב את ההדמיות האלה ולהחיל אותן, לדוגמה, על תהליכים ביו-מולקולריים מסובכים בתא או על המבנה של חומרים מתחכמים.



מולקולה במודל כדור מקל

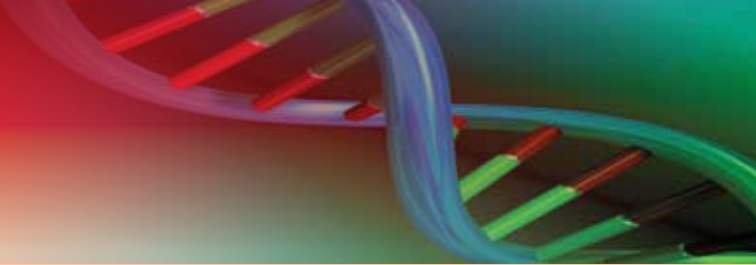


3. כיצד הסביבה משפיעה על הגנים שלנו

הרעיון הוותיק של הביולוגיה היה: מהותנו נקבעת על ידי הגנים שלנו. כיום ברור ששאלה לא פחות חשובה היא באילו גנים אנו משתמשים. וכמו בכל דבר בביולוגיה, בלב השאלה הזאת עומדת הכימיה.

תאים של עובר בשלב מוקדם יכולים להתפתח לכל סוג של רקמה. אבל ככל שהעובר גדל, התאים האלה, המכונים תאי גזע פלורופוטנטיים, עוברים התמיינות ורוכשים תפקידים ספציפיים (כמו תאי דם, שריר או עצב), תפקידים הנותרים קבועים בצאצאיהם. היווצרות הגוף האנושי היא אפוא תהליך שבו הכרומוזומים בתאי הגזע עוברים שינוי כימי המפעיל או מכבה מערכים שלמים של גנים.

ואולם, אחת התגליות המהפכניות ביותר בחקר השיבוט ותאי הגזע הייתה שהשינויים האלה הפיכים ומושפעים מהתרחשויות שהגוף חווה. במהלך ההתמיינות התאים



טווח וארוכי טווח. לעומת זאת, תהליכי זיכרון מורכבים יותר המכונים זיכרון הצהרתי (כמו זיכרון של אנשים, מקומות וכדומה) מתרחשים באמצעות מנגנון שונה במקום אחר במוח. תהליכים אלה כרוכים בהפעלת חלבון הקרוי קולטן NMDA המצוי על תאי עצב מסוימים. חסימת הקולטן הזה באמצעות סמים מונעת את שמירתם של זיכרונות הצהרתיים מסוגים רבים.

הזיכרונות ההצהרתיים היום-יומיים שלנו מקודדים לעתים קרובות באמצעות תהליך הקרוי העצמה ארוכת טווח, שבו מעורבים קולטני NMDA והוא מלווה בהתרחבות האזור הניורוני של סינפסה. ככל שהסינפסה גדלה, כן "מתחזק" הקשר עם תאים שכנים, כלומר עולה המתח החשמלי שמשרים אותות עצביים המגיעים לצומת הסינפטי. הביוכימיה של התהליך הזה התבררה בשנים האחרונות. התהליך כרוך בהיווצרות סיבים בתוך תא העצב הבנויים מן החלבון אקטין, החומר המשתתף גם בבניית השלד הבסיסי של התא והקובע את גודלו וצורתו. אבל אם גורמים ביוכימיים ימנעו את ייצובם של הסיבים החדשים, התהליך יפסק והסיבים יתפרקו.

ברגע שזיכרון ארוך טווח עובר קידוד, בתהליכי למידה פשוטים או מורכבים כאחד, הוא מתוחזק באופן פעיל באמצעות הפעלה של גנים הגורמים להופעתם של חלבונים מסוימים. כרגע נראה שבתהליך הזה עשויה להיות מעורבת מולקולה הקרויה פֶּרִיון. פריונים הם חלבונים המסוגלים להתנדוד בין שתי צורות מרחביות שונות. אחת הצורות מסיסה במים והאחרת אינה מסיסה. הצורה הבלתי מסיסה פועלת כזרז הגורם למולקולות דומות לה להיעשות בלתי מסיסות אף הן ולהצטבר לגוש. הפריונים התגלו לראשונה בשל תפקידם במחלות ניוון עצבי כמו מחלת הפרה המשוגעת, אבל כיום ברור שלמנגנוני הפעולה של פריונים יש גם תפקיד מועיל: הצטברותם מסמנת סינפסה מסוימת כדי לשמור באמצעותה זיכרון.

בסיפור פעולות הזיכרון יש עדיין פערים גדולים, שרבים מהם ממתנים להיסגר באמצעות הבהרת הפרטים הכימיים. למשל, כיצד נשלף הזיכרון לאחר שאוכסן? "זאת בעיה עמוקה שאנחנו רק מתחילים לנתח אותה", אומר

גנים מסוימים, או להפך, לשחרר אותם לפעולה. הסימון הזה קרוי "אֶפִּיגֶנֶטִּיקָה" מפני שהוא אינו משנה את המידע שהגנים עצמם נושאים.

נראה שהתשובה לשאלה עד כמה אפשר להחזיר תאים בוגרים למצב פלורפוטנטי, כלומר, האם אפשר להחזירם למצב שבו הם יפעלו כמו תאי גזע אמיתיים, שהיא סוגיה מכריעה לגבי האפשרות להשתמש בהם לרפואה מחדשת (רגנרטיבית) – תלויה בעיקר בשאלה עד כמה אפשר לבטל את הסימון הכימי האֶפִּיגֶנֶטִּי.

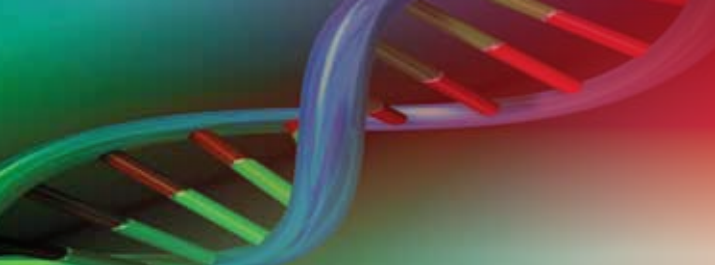
כיום ברור שמעבר לקוד הגנטי המכתיב רבות מהוראות ההפעלה החשובות של התא, התאים משוחחים גם בשפה כימית גנטית נפרדת לגמרי – שפת האֶפִּיגֶנֶטִּיקָה. "לאנשים עשויה להיות נטייה מוקדמת ללקות במחלות רבות ובהן סרטן, אבל לעתים קרובות גורמים סביבתיים הם אלה שיקבעו אם היא תתפרץ או לא, באמצעות המסלולים האֶפִּיגֶנֶטִּיים האלה," אומר הגנטיקאי בריאן טרנר מאוניברסיטת ברמינגהם באנגליה.



4. כיצד המוח חושב ויוצר זיכרונות

המוח הוא מחשב כימי. התגובות ההדדיות בין תאי העצב הבונים את המעגלים שלו מתואכות באמצעות מולקולות הקרויות שליחים עצביים (ניורו-טרנסמיטרים). השליחים האלה חוצים את הסינפסות, נקודות המגע שבהן תאי העצב נקשרים זה לזה. המפגן המרשים ביותר של הכימיה של החשיבה הוא אולי בהפעלת הזיכרון, תהליך שבו עקרונות ורעיונות מופשטים, כמו מספר טלפון או אסוציאציה רגשית, מוטבעים במצבים מסוימים של הרשת העצבית באמצעות איתותים כימיים מתמשכים. כיצד הכימיה יוצרת זיכרון מתמיד ודינמי כאחד ומאפשרת גם להיזכר בו, גם לשנותו וגם לשכוח אותו?

אנחנו יודעים חלקים מן התשובה. אשד של תהליכים ביוכימיים, המוליכים לשינוי בכמות מולקולות השליחים העצביים בסינפסה מעורר למידה של רפלקסים של הרגל. אבל אפילו להיבט הפשוט הזה של הלמידה יש שלבים קצרי



בדעיכה רדיואקטיבית, לעתים בתוך שבריר שנייה. אבל כל עוד מתקיימים היסודות הסינתטיים האלה, כמו סיבֶרְגִּיּוּם (מספר אטומי 106) והֶסְיוּם (108), הם יסודות לכל דבר, ויש להם תכונות כימיות מובהקות. באמצעות ניסויים מדהימים, מדענים מבקשים לחקור כמה מן התכונות האלה באמצעות קומץ קטן של אטומי סיבֶרְגִּיּוּם והסיוּם חמקמקים ברגעים הקצרים שלפני התפרקותם.

המחקרים אינם בוחנים רק את הגבולות הפיזיים של הטבלה המחזורית, אלא גם את גבולותיה העקרוניים: האם היסודות הסופר-כבדים ממשיכים להציג את המגמות ואת ההתנהגות הכימית המחזורית המאפיינות את הטבלה מלכתחילה? התשובה היא שכמה מהם ממשיכים בכך, וכמה לא. ובייחוד, הגרעינים האלה, בעלי המסה הגדולה, מושכים את האלקטרונים הקרובים ביותר לגרעין בעוצמה כזאת עד שהאלקטרונים נעים במהירויות קרובות למהירות האור. בתנאים אלה גדלה מסת האלקטרונים, על פי תורת היחסות הפרטית, והדבר עלול לשבש לגמרי את מערך רמות האנרגיה הקוונטיות שבהן תלויה ההתנהגות הכימית שלהם - וגם עצם מחזוריותה של הטבלה.

גרעיני אטומים בעלי "מספרי קסם" מסוימים של פרוטונים ונייטרונים נחשבים יציבים יותר. כמה חוקרים מקווים אפוא למצוא את האזור בטבלה המחזורית, אזור המכונה "אי היציבות". אזור זה מצוי קצת אחרי היסודות המלאכותיים שהטכנולוגיה המצויה בידנו מסוגלת ליצור, ובו הגרעינים הסופר-כבדים יתקיימו במשך זמן ארוך יותר. ועם זאת,

הניורוביולוג וחתן פרס נובל אריק קנָדל מאוניברסיטת קולומביה.

הבנה מעמיקה של הכימיה של הזיכרון מעמידה לפנינו את הפיתוי השנוי במחלוקת של שיפור הזיכרון באמצעות תרופות. כבר כיום אנו מכירים כמה חומרים ממריצי זיכרון, ובהם הורמוני מין וכימיקלים סינתטיים, הפועלים על קולטנים של ניקוטין, גלוקטמין, סֶרוֹטוֹנִין ושליחים עצביים

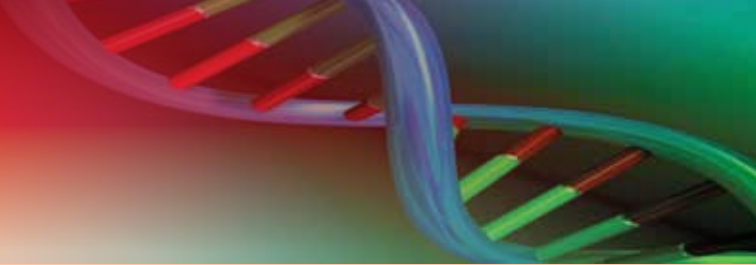


אחרים. למעשה, רצף הצעדים המורכב, המוליך ללמידה ולזיכרון ארוכי טווח, זרוע במטרות אפשריות רבות לסמי זיכרון כאלה, אומר הניורוביולוג גארי לינץ' מאוניברסיטת קליפורניה באירוויין.

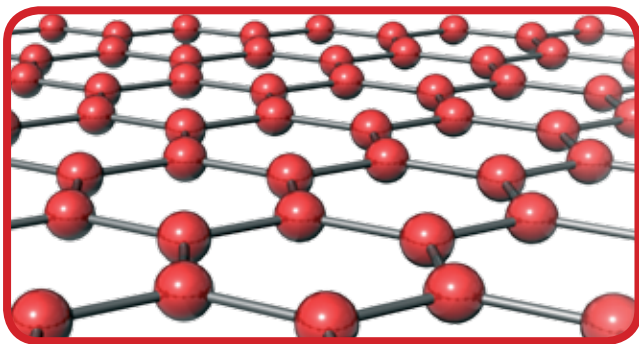
?

5. כמה יסודות כימיים קיימים

הטבלות המחזוריות המעטרות את קירותיהן של כיתות הלימוד זקוקות לעדכון שוטף מפני שמספר היסודות ממשיך לעלות. מדענים נעזרים במאיצי חלקיקים כדי ליצור התנגשויות בין גרעינים אטומיים וליצור יסודות "סופר-כבדים" חדשים, שבגרעיניהם יש יותר פרוטונים ונייטרונים משיש בגרעיניהם של כ-92 היסודות המצויים בטבע. הגרעינים התפוחים האלה אינם יציבים כלל והם מתפרקים



זולים וקשיחים. התקווה היא שתעשיית המחשבים תוכל להשתמש בסרטים צרים וברשתות של גרפן, שייגזרו במידות המתאימות וברמת דיוק אטומית, כדי לבנות שבבים שיפיגו ביצועים טובים יותר מאלה המבוססים על סיליקון.



מודל של גרפן

“אפשר לעצב גרפן בצורה כזאת שתתגבר על בעיות חיבורן של צינורות הננו הפחמניות ומיקומן,” אומר מומחה הפחמן וולט דה-היר מן המכון הטכנולוגי של ג'ורג'יה. אבל הוא מוסיף שהשיטות [המקובלות כיום בתעשיית המחשבים], כמו איכול כימי, הן שיטות גסות מדי לעיצוב מעגלי גרפן ברמת דיוק של אטום יחיד. דה-היר חושש אפוא שטכנולוגיית הגרפן חייבת היום את מעמדה ל“רייטינג” ופחות למדע קפדני. ייתכן שהמפתח להנדסה מדויקת כזאת בקנה מידה אטומי הוא השימוש בשיטות הכימיה האורגנית: בניית מעגלי גרפן מלמטה למעלה, כלומר חיבורן יחדיו של מולקולות פולי-ארומטיות, המכילות כמה טבעות פחמן משושות, הנראות כמו חלקים קטנים של משטח גרפן. שיטות כאלה יוכלו לפתוח את השער לעתיד האלקטרוניקה מבוססת הגרפן.



7. כיצד נוכל לנצל אנרגיה סולרית רבה יותר

כל זריחת שמש מזכירה לנו שאנחנו מנצלים רק שבריר מעורר רחמים של משאב האנרגיה הנקייה הענקי הזה – השמש. הבעיה העיקרית היא העלות: מחירים של לוחות פוטו-וולטאים רגילים, העשויים צורן, עדיין מגבילים את

האם יש גבול עקרוני לגודלם? חישוב פשוט מרמז שתורת היחסות מונעת את קיומם של גרעינים בעלי יותר מ-137 פרוטונים. אבל חישובים מורכבים יותר קוראים תיגר על הגבול הזה. “המערכת המחזורית לא תסתיים ב-137, למעשה, היא לא תיגמר לעולם,” מתעקש הפיזיקאי הגרעיני וולטר גריינר מאוניברסיטת יוהן וולפגנג גתה בפרנקפורט שבגרמניה. המבחן הניסויי לטענה הזאת עדיין רחוק מאוד.

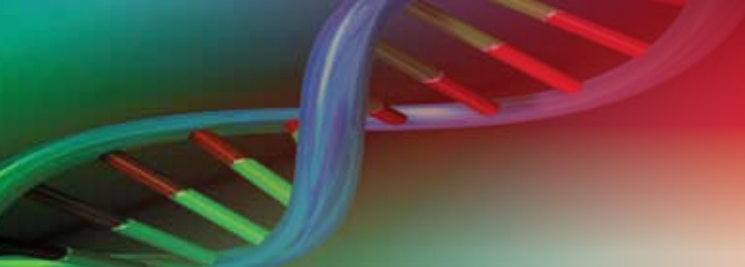


6. האם אפשר לבנות מחשבים מפחמן

שבבי מחשב העשויים גרפן, רשת של אטומי פחמן, יוכלו כנראה להיות מהירים וחזקים יותר ממחשבים המבוססים על סיליקון (צורן). מגלי הגרפן אמנם זכו בפרס נובל בפיזיקה בשנת 2010, אבל הצלחתה של ננוטכנולוגיה המבוססת על גרפן, או על סוגי פחמן אחרים, תלויה בסופו של דבר ביכולתם של כימאים ליצור מבנים ברמת דיוק אטומית.

ב-1985 גילו את כדורי באקי, מולקולות חלולות, דמויות כלוב, העשויות רק מאטומי פחמן. זו הייתה נקודת ההתחלה למשהו גדול הרבה יותר. שש שנים לאחר מכן הופיעו צינורות פחמן שהאטומים המרכיבים אותן מסודרים ברשת משושים, הדומה לרשת של לולי תרנגולות, בדיוק כפי שהם מסודרים בשכבות הפחמן בגרפיט. מכיוון שצינורות-ננו פחמניות אלה חלולות, חזקות להפליא, נוקשות ומוליכות חשמל, הן הבטיחו מגוון יישומים, החל מחומרים מרוכבים מבוססי פחמן בעלי חוזק גבוה, עד לתילי חשמל זעירים והתקנים אלקטרוניים, ועד לכמוסות מולקולריות זעירות ולקרומים לסינון מים.

אך על אף ההבטחה, צינורות הננו הפחמניות לא הניבו יישומים מסחריים רבים. למשל, החוקרים לא הצליחו לפתור את בעיית החיבור של הצינורות למעגלים אלקטרוניים מסובכים. לאחרונה, עלתה הגרפיט למרכז הבמה לאחר שנמצאה דרך להפריד את השכבות המרכיבות אותה לשכבות יחידות, הדומות לרשת לולים, וקרויות גרפן. חומר זה עשוי לשמש בסיס למעגלים חשמליים זעירים מאוד,



אינם מצוידים (עדיין) במנגנון מלא לסינתזה כימית כמו זה שפועל בתא חי.



8. מהי הדרך הטובה ביותר לייצר דלקים ביולוגיים

במקום ליצר חומרי דלק באמצעות לכידת קרני האור מן השמש, אולי נשאיר את מלאכת אגירת אנרגיית השמש לצמחים ואז נהפוך את החומר הצמחי לדלק? דלקים ביולוגיים, כמו אתאנול, המופק מתירס, וביו-דיזל, המופק מזרעים, כבר השתלבו בשוקי האנרגיה. אבל הם מאיימים להחליף גידולי מזון, בייחוד במדינות מתפתחות שבהן ייצוא דלקים ביולוגיים עשוי להכניס יותר מאספקת מזון לאוכלוסייה בבית. והמספרים מפחידים: כדי לעמוד בביקושי הדלק כיום תידרש הפקעת שטחים ענקיים של אדמה פורייה.

לפיכך, הפיכת מזון לאנרגיה היא אולי לא הגישה הטובה ביותר. אחת התשובות היא לנצל צורות אחרות, חיוניות פחות, של ביו-מסה. די בכמות השאריות שחקלאות ארה"ב ויערותיה מייצרים מדי שנה כדי לספק כשליש מצריכת הבנזין והדיזל השנתית לתחבורה.

כדי להפוך את הביו-מסה הפחות איכותית הזאת לחומרי דלק, צריך לשבור מולקולות קשיחות מאוד כמו ליגנין ותאית, אבני הבניין של הצמחים. כימאים כבר יודעים לעשות זאת, אבל השיטות הנוכחיות נוטות להיות יקרות מדי, בלתי יעילות או כאלה שקשה להגדיל את היקפן כדי לעמוד בכמויות הדלק האדירות שהכלכלה צריכה.

אחד האתגרים בפירוק ליגנין הוא בשבירת קשרי פחמן-חמצן המגשרים בין טבעות פחמן ארומטיות, דמויות בנזן. ג'ון הרטוויג ואלכסיי סרגייב מאוניברסיטת אילינוי הצליחו לא מזמן להתגבר על האתגר הזה באמצעות זרז מבוסס ניקל. הרטוויג אומר שאם רוצים להשתמש בביו-מסה כתחליף לחומרי הגלם הכימיים ולחומרי הדלק המגיעים כיום מדלקים מחצביים, הכימאים חייבים להפיק מן הביו-מסה חומרים ארומטיים (מולקולות בעלות שלד המורכב

השימוש בהם. אבל החיים על פני כדור הארץ, שכמעט כולם מונעים, בסופו של דבר, באמצעות פוטוסינתזה על ידי אור השמש, מוכיחים לנו שתאים סולריים לא חייבים להיות יעילים מאוד, בתנאי, שכמו עליהם, יהיה אפשר לייצר אותם בכמות גדולה ובמחירים נמוכים דיים.

"אחת ממטרות העל של המחקר בתחום האנרגיה הסולרית היא שימוש באור השמש כדי לייצר חומרי דלק," אומר דיוונס גאסט מאוניברסיטת מדינת אריזונה. הדרך הקלה ביותר לייצר חומר דלק מאנרגיית השמש היא פירוק מים ויצירת מימן וחמצן גזיים. נתן ס' לואיס ועמיתיו במכון הטכנולוגי של קליפורניה (קלטיק) מפתחים עלה מלאכותי שאמור לעשות זאת באמצעות תילי-ננו עשויים צורן.

בראשית 2011 חשפו דניאל נוסרה מן המכון הטכנולוגי של מסצ'וסטס (MIT) ועמיתיו את פיתוחה של קרומית (ממברנה) מבוססת צורן המכילה זרז הפועל באמצעות קוֹבַלְט שמפרק מים. נוסרה מעריך שיהיה די בפחות מ-4 ליטרים של מים כדי לספק די דלק ליום אחד לבית אחד במדינות מתפתחות. "מטרתנו היא להפוך כל בית לתחנת הכוח של עצמו," הוא אומר.

שבירת מים באמצעות זרז היא עדיין משימה קשה. "בזרזי קובלט, כמו זה של נוסרה, ובזרזים אחרים שהתגלו לאחרונה, זרזים המבוססים על מתכות נפוצות אחרות, טמונה הבטחה," אומר גאסט, אבל עדיין לא נמצא הזרז הזול האידאלי. "אנחנו עדיין לא יודעים כיצד פועל הזרז הטבעי בפוטוסינתזה, המבוסס על ארבעה אטומי מנגן ואטום סידן אחד," מוסיף גאסט.

גאסט ועמיתיו מחפשים דרך לבנות מנגנונים מולקולריים לפוטוסינתזה מלאכותית שיהיו דומים יותר למקורות ההשראה הביולוגיים. הצוות שלו הצליח לסנתז כמה מרכיבים שאפשר יהיה לשלבם במנגנון כזה. אבל עדיין דרושה עבודה רבה בחזית הזאת. מולקולות אורגניות כמו אלה שבהן הטבע משתמש נוטות להתפרק במהירות. צמחים מייצרים ללא הרף חלבונים חדשים, המחליפים את אלה שהתפרקו, אך לעומת זאת עליהם מלאכותיים

מטבעות ארומטיות). ליגנין הוא המקור הפוטנציאלי הגדול היחיד של חומרים ארומטיים בביו-מסה.

מבחינה מעשית, המרה כזאת של ביו-מסה תצטרך לפעול בעיקר על חומרים מוצקים ולהפוך אותם לדלקים נוזליים שאפשר להזרים בקלות בצינורות. תהליך הניזול יצטרך להתרחש בשטח, במקום שבו הצמחים נאספים. אחד הקשיים בהמרה כזאת באמצעות זרזים היא העובדה שחומרי הגלם רחוקים מאוד מלהיות טהורים. כימיה סינתטית קלסית אינה עוסקת בדרך כלל בחומרים מלוכלכים כמו עץ. "אין הסכמה בדבר הדרך שהדבר יתבצע בסוף", אומר הרטוויג. הפתרון מונח בוודאות על כתפי הכימיה, בייחוד מציאת הזרזים הנכונים. "כמעט כל תגובה תעשייתית בהיקפים גדולים קשורה לזרז כלשהו", אומר הרטוויג.



9. האם נוכל למצוא דרכים חדשות ליצירת תרופות

לב לבה של הכימיה הוא מעשי ויצירתי: בניית מולקולות. זהו המפתח ליצירת כל דבר, החל מחומרים חדשים ועד תרופות אנטיביוטיות שיתגברו על עלייתם של חיידקים עמידים.

אחת התקוות של שנות ה-90 הייתה הכימיה הצירופית: בניית אלפי מולקולות חדשות, באמצעות צירופים אקראיים של אבני בניין, וסריקת התוצרים כדי לזהות את המבצעים את המשימה הדרושה על הצד הטוב ביותר. אבל כיום סר חינו של התחום הזה, שהוכרז בזמנו כעתיד הכימיה הרפואית, משום שהוא כמעט לא הביא תועלת מעשית.

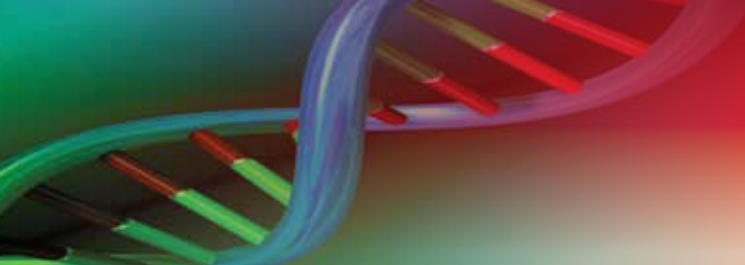
אבל הכימיה הצירופית עשויה לזכות בסיבוב שני מוצלח יותר. היא עשויה לפעול רק אם נוכל להפיק מגוון רחב דיו של תוצרים, למצוא דרכים טובות יותר לבחירתן של המולקולות המוצלחות ולמצות את הכמויות הזעירות שלהן. הביוטכנולוגיה יכולה להיות לעזר. למשל, אפשר לקשור כל מולקולה ל"בר-קוד" המבוסס על דנ"א שיוכל לזהות את המולקולות וגם לעזור במיצוין. בגישה אחרת,

חוקרים יכולים לשכלל את ספריית המולקולות המועמדות באמצעות תהליך הדומה לאבולוציה דרווינית במבחנה. הם יכולים, למשל, לקודד מולקולות של תרופות מבוססות חלבונים ברצף דנ"א מתאים ולשכפל אותו במנגנון הנוטה לטעויות. שכפול כזה ייצור גרסאות חדשות של המולקולות המוצלחות ביותר, וכך יימצאו שיפורים בכל מחזור של שכפול וברירה.



שיטות חדשות אחרות מתבססות על מיומנותו של הטבע בחיבור חלקים מולקולריים זה לזה בסיידורים קבועים מראש. לחלבונים, למשל, יש סידור מדויק של חומצות אמיניות מפני שהרצף הזה מקודד בגנים. באמצעות מודל כזה יוכלו כימאי העתיד לתכנת מולקולות להרכיב את עצמן באופן עצמאי. לגישה יש גם יתרון "ירוק" מפני שהיא מפחיתה את כמות תוצרי הלוואי האופייניים לתהליכי הייצור הכימיים המסורתיים ואת בזבז האנרגיה וחומרי הגלם המלווה אותם.

דיוויד ליו מאוניברסיטת הרווארד ועמיתיו פועלים בגישה הזאת. הם תכנתו את מבנה המולקולה הרצויה באמצעות חיבור גדילי דנ"א קצרים לאבני הבניין שלה. הם גם יצרו מולקולה המסוגלת לנוע על דנ"א, לקרוא את הקוד ולחבר מולקולות קטנות, על פי הסדר, לאבני הבניין כדי ליצור את המולקולה הרצויה, תהליך מקביל לסינתזת חלבונים בתאים חיים. השיטה של ליו עשויה להיות שימושית בבניית תרופות חדשות. "מדענים רבים העוסקים במדעי החיים ברמה המולקולרית סבורים שמולקולות ענק ימלאו תפקיד



עשוי להביא לאבחון מדויק יותר בשלב הנכון. קביעה מהירה של פרופיל גנטי תאפשר משטר תרופות מותאם אישית, תקטין את הסיכון לתופעות לוואי ותאפשר שימוש בכמה תרופות, שימוש שמתעכב כיום מפני שתרופות אלה מסוכנות למיעוט גנטי מסוים.

יש כימאים החוזים ניטור רציף ולא פולשני של שלל סמנים ביוכימיים לבריאות ולחולי. מנתחים יוכלו להיעזר אולי במידע בזמן אמת ומערכות אוטומטיות יספקו תרופות. החזון העתידי הזה תלוי בפיתוח שיטות כימיות לחישה סלקטיבית של חומרים מסוימים ולאיתות על הימצאותם גם בריכוזים נמוכים מאוד.

Beyond the Molecular Frontier: Challenges for Chemistry and Chemical Engineering. National Research Council. National Academies Press, 2003.

Beyond the Bond. Philip Ball in Nature, Vol. 469, pages 26-28; January 6, 2011.

Let's Get Practical. George M. Whitesides and John Deutch in Nature, Vol. 469, pages 21-22; January 6, 2011.

מרכזי יותר, ואולי אף מכריע, בעתיד תהליכי הריפוי, אומר ליו.



10. הנוכל לנטר באופן רציף את הכימיה שלנו

יותר ויותר כימאים שואפים לא רק ליצור מולקולות אלא גם לתקשר עמן: להשתמש בכימיה כבטכנולוגיית מידע שתשמש ממשק עם כל דבר, החל בתאים חיים עד למחשבים רגילים וכלה בתקשורת בסיבים אופטיים.

חזון זה הוא בחלקו רעיונות ותיקים: חיישנים כימיים שבהם משמשות תגובות כימיות כדי לדווח על ריכוזי הגלוקוז בדם נוצרו כבר בשנות ה-60 של המאה ה-20, אם כי רק לאחרונה הם נעשו זולים, ניידים ונפוצים דיים כדי לשמש כלי ניטור לסוכרת. אבל לחישה הכימית עשויים להימצא אין-ספור שימושים: זיהוי מזהמים במזון ובמים בריכוזים נמוכים מאוד, למשל, או ניטור גזים מזהמים או נדירים באטמוספירה. חיישנים כימיים מהירים, זולים, רגישים ונפוצים יותר יביאו התקדמות ניכרת בתחומים האלה.

אבל התחום שבו תהיה לחיישנים הכימיים החדשים האלה השפעה דרמטית יותר מכול הוא כנראה תחום הביו-רפואה. כמה מן התוצרים של גנים סרטניים, למשל, נפוצים במחזור הדם זמן רב לפני שהמחלה מתגלה בבדיקות מעבדה רגילות. איתור החומרים האלה בשלבים מוקדמים