

שאלות שלמדע אין תשובה עליהן || מהן מגבלות השליטה על החומר?

המיומנות הגוברת של האדם בעיצוב חומרים שונים לצרכיו, מובילה כבר אלפי שנים למהפכות באורחות החיים — מייצור כלי נשק קדמוניים ועד לייצור מעגלים חשמליים. כיום מתחילים המדענים לגלות את הפוטנציאל העצום של היכולת לשלוט במיקומים של אטומים בודדים בחומר

אסף רונאל, איור: דורון פלם 26.09.2019 14:03

לפני יותר משני מיליון שנה גילו אבות אבותינו הקדומים כי אם מסתתים חלקי אבן, ניתן להשתמש בנתזים החדים שנוצרים ככלי עבודה וצייד (וכנראה גם נשק). גילוי זה זיכה את אותו מין של אדם קדמון בשם "הומו האביליס" — האדם המיומן. מאז ועד היום, המיומנות הגוברת של האדם בשליטה על חומר ובעיצובו לצרכיו, יצרה מהפכות חוזרות ונשנות באורחות החיים הבסיסיים של המין האנושי.

חמש שאלות גדולות שלמדע אין עדיין תשובה עליהן | לפרויקט המלא

פרופ' בינה קליסקי מהמחלקה לפיזיקה ומהמכון לננו־טכנולוגיה וחומרים מתקדמים באוניברסיטת בר אילן מסבירה כי בימים אלה מתחוללת מהפכה חדשה שבה מצליחים לראשונה לייצר חומרים שלא היו קיימים בטבע, תוך שליטה במיקום של כל אטום בחומר. לדברי הפיזיקאית, חברת האקדמיה הצעירה למדעים, השאלה הגדולה בתחום היא מהם גבולות היכולת לשליטה בחומרים חדשים אלה. גבולות אלה תלויים בהבנתנו את האופן שבו מבנה החומר קובע את התכונות שלו ("עיפרון ויהלום עשויים מאותם אטומים של פחמן, רק שהם מסודרים בסדר שונה", מזכירה החוקרת) וביכולת לתכנן את התכונות של החומרים החדשים שאנו מייצרים.

אמנם כלי האבן שיצר ההומו האביליס אינם דומים לאלה ששימשו את ההומו סאפיינס בתקופת האבן המאוחרת, אך העיקרון הבסיסי של השימוש בחומר היה זהה: למצוא את הגלם המתאים בטבע (כשהשאיפה היא שהוא יהיה האיכותי ביותר — קשיח ככל הניתן במקרה של אבנים) ולעבד אותו כך שאפשר יהיה ליהנות מתכונותיו הטבעיות. המהפכה הראשונה קרתה עם תחילתו של עידן הברונזה, כשבני האדם הבינו כי אם מערבבים שני חומרים — במקרה זה נחושת ובדיל — מקבלים חומר חדש (ברונזה) עם תכונות שונות מהקודמים.

רעיון זה, של יצירת סגסוגות מתכת, התגלה לראשונה לקראת סוף האלף השני לפני הספירה, ומפתחיו הצליחו להגיע לתוצאות מדהימות, למרות שהידע והכלים הפיזיקליים שלהם היו רחוקים מהקיימים היום: התכת היסודות והערבוב ביניהם יוצרים קשרים חדשים בין האטומים ואתם תכונות חדשות של החומר, לצד הישמרות של חלק מתכונות החומרים המקוריים, כמו הצפיפות או יכולת ההולכה החשמלית. פרופ' קליסקי מזכירה כי סגסוגות חדשות וחשובות הומצאו גם בעידן המודרני, כמו פיתוח הדוראלומין, סגסוגת של אלומיניום, נחושת ומגנזיום, בשנת 1909. סגסוגת זו התגלתה כקלה בהרבה מפלדה, אך קשיחה באופן משמעותי מאלומיניום, והיא מילאה תפקיד מרכזי בהתפתחות ענף התעופה, בכך שאפשרה לבנות כלי טיס קשיחים ועמידים.

השיטה הבאה לשליטה על תכונות החומר, שעליה בעצם מבוסס חלק ניכר מהטכנולוגיה המודרנית, נקראת אילוח או סימום (חוקי לחלוטין): הוספת זיהום בשיעור זעיר של חומר אחד לתוך חומר אחר. שיטה זו, אומרת פרופ' קליסקי, היא הבסיס ליצירת חומרים שניתן לשלוט (לכבות ולהדליק) בתכונת ההולכה שלהם. חומרים מוליכים למחצה זוהו כבר במאה ה-19, אולם רק במאה ה-20 גילו חוקרים כיצד ניתן לשלוט באופן מבוקר אטומים אחרים בתוכם. גילוי זה הפך את המוליך למחצה לקרקע פורייה לשתילתם של אטומים שונים בשכנות קרובה, וכך ניתן לבנות מעגלים חשמליים ממש כמו לצייר על דף עם צבעים שונים.

השימוש באילוח אפשר למדענים לפתח מתגים זעירים שניתן לקבוע אם הם מעבירים זרם חשמלי או לא: טרנזיסטורים (המלה טרנזיסטור היא הלחם של Transmitter, מעביר, ו-Resistor, מתנגד). פיתוח הטרנזיסטורים אפשר למדענים לזנוח את שפופרות הוואקום שעמן בנו מחשבים עצומים בגודלם ומוגבלים בביצועם. וכך, היכולת להוסיף לחומר אחד "זיהום" של חומר אחר מילאה תפקיד משמעותי בהתפתחות הטכנולוגיה האנושית במאה ה-20, והיא עומדת בבסיס האלקטרוניקה המודרנית.

פרופ' קליסקי מסבירה כי החל משנות ה-60, החלה להסתמן דרך חדשה לייצר חומרים: "הנדסה אטומית", שבה מגדלים באופן מבוקר שכבות אטומים, תוך שליטה על המבנה המדויק שבו האטומים מתחברים זה לזה ומכאן על התכונות שלהם. לדוגמה, מספרת הפיזיקאית מבר אילן, בשיטה

שנקראת גידול שכבתי מולקולרי (MBE), מחממים "מטרות" מחומר מסוים בתוך תא ואקום עוצמתי במיוחד עד שהחומר ממריא (הופך ממוצק לגז). ואז, בעזרת שליטה על הטמפרטורה, הלחץ, רמות האנרגיה ועוד יכולים החוקרים לקבוע כיצד האטומים של החומר יתגבשו על מצע ייעודי הנמצא בתוך תא הוואקום. טכניקות מדידה בעזרת לייזר גם מאפשרות מעקב צמוד אחרי האופן שבו כל שכבה של אטומים חדשה מצטרפת לקודמותיה.

כיוון נוסף של שליטה על מבנה החומר ברמה האטומית קשור ליכולת ליצור חומרים דו-ממדיים (הבנויים משכבה יחידה של אטומים) ואז לערום שכבות של חומרים שונים, או אפילו שכבות של אותו חומר בשינוי מסוים — למשל בזווית — וכך ליצור חומרים עם תכונות חדשות. חומרים אלה, שהחיבור ביניהם נובע מהכוחות הפועלים בין שני אטומים, נקראים חומרי ואן דר ואלס, על שם המדען ההולנדי יליד המאה ה-19 יוהנס דידייק ואן דר ואלס.

למשל כאשר מניחים שכבה של גרפן (יריעה דו-ממדית של אטומי פחמן) בזווית ספציפית שקיבלה את השם "זווית הקסם", על שכבה נוספת של גרפן, מקבלים חומר עם תכונה של מוליכות על — אחד מהיעדים הנחשקים ביותר של חוקרי מדעי החומר. תשומת לב רבה, מספרת פרופ' קליסקי, ניתנת גם לשילוב בין שכבות של אוקסידים (תחמוצות בעברית: תרכובות של חומרים עם חמצן) שונים. ואז, בממשק בין שכבות דו-מדיות של שני אוקסידים מתקבלות תכונות והתנהגויות שלא היו קיימות באף אחד מהחומרים המקוריים, כמו ננו-מגנטיות ומוליכות על.

פרופ' קליסקי מודה כי במקרים רבים, בניית החומרים החדשים עדיין נעשית בשיטה של ניסוי וטעייה. אולם לצד השליטה הגוברת בהנדסה האטומית של החומר, ישנה התקדמות מקבילה בהבנה התיאורטית והחישובית של האופן שבו המבנה השונה של החומר יוצר תכונות שונות. חשובה לא פחות, אומרת הפיזיקאית, היא היכולת המשתכללת למדוד, לאפיין ולהבין את תכונות החומרים החדשים — משימה לא פשוטה, למשל כאשר מנסים למדוד מאפיינים של שכבה בודדת של אטומים. כך לדוגמה במעבדתה משתמשים במכשיר שמסוגל להרגיש את השדה המגנטי הקטן ביותר שיש — של אלקטרון יחיד.

פיתוח מודלים תיאורטיים וכלים חישוביים חדשים שינבאו כיצד מבנה אטומי מסוים יפיק תכונות רצויות, טכניקות נוספות לשליטה במבנה זה, מכשירי מדידה מדויקים יותר לאפיון התכונות של החומרים החדשים צפויים לאפשר בשנים הבאות פיתוח של חומרים חדשים שכלל לא קיימים בטבע, שאת חלקם אי אפשר בכלל לנחש כיום. "כמו שראינו פעמים רבות בעבר", אומרת פרופ' קליסקי, "אנחנו כנראה לא מצליחים עדיין לדמיין מהן האפליקציות החשובות ביותר שיתגלו מחיפושים אלה". אולם יעד אחד מסתמן כבר היום כ"גביע הקדוש" של התחום, שאם יושג יחולל מהפכה נוספת בחיים האנושיים: היכולת לבנות חומרים מוליכי על בטמפרטורת החדר. חומרים אלה, שמעבירים אלקטרונים בלי התנגדות, קיימים היום בטמפרטורות נמוכות במיוחד, שעלות השמירה עליהן עצומה, ולכן השימוש בהם מוגבל. אם הכלים החדשים ליצירת חומרים שלא קיימים בטבע יביאו לפיתוח חומר מוליך על בטמפרטורת החדר, הגילוי יאפשר, בין השאר, חיסכון עצום באנרגיה, הצבת מכשירי MRI במרפאות שכונתיות ונסיעה לעבודה ברחפת.