

ננומכניקה - המדע בשרות הטכנולוגיה או שמא להיפך?

רון ליפשיץ, בית הספר לפיסיקה ואסטרונומיה, הפקולטה למדעים מדויקים ע"ש ריימונד וברלי סקלר, אוניברסיטת ת"א

חזון הננוטכנולוגיה

ה"ננו" היא קידומת ליחידות מידה - שמקורה במילה היוונית **νᾶνος** (nanos), שפרושה ננס - המציינת את המספר **10⁻⁹** במונח "ננוטכנולוגיה" הכוונה היא ליחידה של אורך - הננומטר - שהיא מיליונית המילימטר, או אלפית המיקרון. בשנת 1959 נתן הפיסיקאי הנודע ריצ'רד פיינמן הרצאה שכותרתה "יש מקום רב בתחתית מהפכנית זו טען פיינמן, בין היתר, כי אין מניעה מבחינה פיסיקלית, שביום מן הימים ניתן יהיה לבנות מכונות שגודלן יימדד בננומטרים. הוא אף הרחיק לכת ושאל מה יקרה אם יתאפשר לנו לסדר את האטומים אחד אחד כרצוננו. פיינמן העריך שהתקדמות הפיסיקה בפרק זמן של כמה עשורים, תאפשר להפוך את הטכנולוגיה בקנה המידה הננומטרי למציאות. הוא צפה שלטכנולוגיה זו יהיו אינספור יישומים, אך בנוסף הוא תאר לעצמו כבר אז, שבאמצעות הננוטכנולוגיה ניתן יהיה לחקור תחומי פיסיקה חדשים, ובכך לקדם את המדע הבסיסי שממנו צמחה הטכנולוגיה. פחות מחמישים שנה לאחר מכן אנו נמצאים בעיצומה של מהפכת הננוטכנולוגיה ועל סף גילויים פיסיקליים חדשים ומרתקים בתחום, שעד לא מזמן, היה בלתי נגיש מבחינה ניסיונית.

מהי הסיבה להתלהבות הרבה מהנושא? האם הננו הוא פשוט יותר קטן מהמיקרו (10^{-6}) ומכאן נובעת ההתלהבות, או שמא ישנו הבדל איכותי בין התחומים? האם עלינו לצפות להתלהבות מחודשת כשנגיע לפיקו (10^{-12}), או שכאן נגמר הסיפור? במאמר זה אנסה לענות על שאלות אלו ולהסביר את הסוגיות המרכזיות הנוגעות לתחום הננומכניקה - תחום מחקר העוסק בהתנהגות המכנית או האלקטרומכנית של גופים זעירים בו אני עוסק מזה מספר שנים.

ייחודיותו של תחום הננו

בשונה ממדעים אחרים כמו הכימיה והביולוגיה, שתחום

עיסוקם מוגבל למספר יחסית קטן של סדרי גודל של אורך, הפיסיקה עוסקת ביישום מששים סדרי גודל של אורך, החל מסקלת פלנק (כ- 10^{35} מטר) שבה נפגשת תורת הקוונטים עם תורת הגרביטציה, ועד לגודל היקום (כ- 10^{27} מטר). אם כך, מה כל כך מיוחד בננומטר כשמדובר בטכנולוגיה, ועל מה מבוססת הטענה שטכנולוגיה זו תיפתח עבורנו צוהר לתגליות פיסיקליות חדשות?

התשובה לחלקה הראשון של שאלה זו נעוצה בעובדה שאבני הבניין הבסיסיות מהן נוכל לבנות ולייצר מכונות זעירות הן האטומים, כפי שפיינמן¹ חזה לפני כחמישים שנה. גודלו של אטום בודד, או המרחק בין זוג אטומים בחומר מוצק, נמדדים באנגסטרמים, שהם עשיריות הננומטר. עשרה אטומי מימן, המסודרים זה לצד זה בשורה, ייצרו שרשרת שאורכה כננומטר אחד. מבחינה טכנולוגית אין יותר קטן מזה, כך שלא מומלץ לרכוש מניות של חברות פיקוטכנולוגיה או פמטוטכנולוגיה. בקני המידה הללו אנו כבר בתוך האטום ובגרעין שלו - תחומים פיסיקליים מעניינים לכשעצמם, אך לא כשמדובר בבניית מכונות זעירות. אם כך, חלק ניכר מן ההתלהבות הנוכחית נובע מן העובדה שהצלחנו להגיע מבחינה טכנולוגית לקצה גבול המזעור.

מזעור הוא שם המשחק, כפי שהורגלנו על ידי תעשיית המיקרואלקטרוניקה. במשך כמה עשורים הצליחה תעשייה זו לשמור על קצב מזעור מעריכי שבו לפי "חוק מור" (Moore's Law) מעגלי האלקטרוניקה נעשים צפופים בערך פי שניים בכל שנה וחצי. זהו הישג מרשים ביותר, ויעידו על כך הטלפונים הניידים שאנו משתמשים בהם, או משחקי הגיימבוי של ילדינו, שיכולות החישוב שלהם לא היו מביישות אף מחשב רחב מימדים לפני כמה עשורים. באופן דומה ישנה מוטיבציה לייצר התקנים מכניים או אלקטרומכניים* קטנים ככל האפשר, ומכאן הדחיפה הראשונית לחקר ולפיתוח הננומכניקה. ככל שהתקן מכני הוא יותר קטן, כך הוא תופס פחות נפח, משקלו קטן יותר, מגיב יותר מהר, צורך הספק נמוך יותר, וברוב המקרים זול יותר

* המונח "התקן אלקטרומכני" מתייחס למכונה או חלק ממכונה המשלבים רכיבים מכניים עם אלקטרוניקה, שתפקידה לשלוט בתנועה המכנית, לחוש אותה, או לבצע מטלות אלקטרוניות נוספות, כגון חישוב או העברת אינפורמציה.

לייצרו (לפחות כשמדובר בתנאים של ייצור המוני כבתעשיית המיקרואלקטרוניקה). התקנים אלקטרומכניים שגודלם בין מיקרון למילימטר, הקרויים "מערכות מיקרואלקטרומכניות" (MEMS או בקיצור Microelectromechanical Systems) קיימים בתעשייה כבר שנים רבות. היישומים למערכות אלה הם רבים ומגוונים, החל מהמנגנון החש את התאוצה השלילית של מכונת בעת התנגשות ומפעיל את כרית האוויר, דרך מערכות ניווט והכוונה של טילים, וכלה במקרני וידיאו דיגיטליים, הבנויים משורות של מיקרו מראות הנעות על ציר ומכוונות את קרני האור אל עבר המסך. התקני ה-MEMS נהנים מכל יתרונות המזעור שנמנו לעיל, ומאחר שהם מיוצרים על פי רוב מסיליקון, גאליום ארסניד או חומרים דומים, הנהוגים בשימוש בתעשיית המיקרואלקטרוניקה, קל ונוח לשלב את הרכיבים המכניים והאלקטרוניים על אותו שבב (chip) זעיר. התקנים אלקטרומכניים שגודלם בין ננומטר למיקרון, שלהם אנו קוראים "מערכות ננואלקטרומכניות" (NEMS או בקיצור Nanoelctromechanical Systems), ודאי יוכלו לנצל את יתרונות המזעור טוב יותר מהתקני ה-MEMS. אך האם NEMS הם פשוט MEMS משופרים, או שמא ישנם יתרונות חדשים ומשמעותיים בתחום הננו?

ראשית, כפי שכבר ציינו, תחום הננו מהווה מבחינה טכנולוגית את קצה גבול המזעור. NEMS אינם סתם MEMS יותר קטנים. אלו המערכות האלקטרומכניות הזעירות ביותר שניתן יהיה אי פעם לבנות. תוצאה ישירה מכך היא העובדה שרבים מן היישומים המתוכננים למערכות אלו מכילים את המילה "בודד". הכוונה היא, לדוגמה, לבנות מד מטען שיהיה ביכולתו למדוד מטען של אלקטרון בודד, לבנות קלורימטר שיוכל לחוש בחום הנפלט מראקציה כימית של מולקולה בודדה, או לבנות התקן שיוכל לשקול מולקולה בודדה. בעזרת מערכות ננואלקטרומכניות ניתן יהיה להשיג את הרגישות האולטימטיבית הזו, משום שהן כה קטנות כך שהתכונות הפיסיקליות שלהן – מוליכות חשמלית, מוליכות חום, תדירות תנודות עצמיות, וכו' – משפעות באופן בר-מדידה משינויים ברמת האטום או המולקולה הבודדים.

שנית, העובדה שהננומטר הוא בעצם קנה המידה המולקולרי, מאפשרת לייצר התקנים ננומכניים על ידי שילוב של טכניקות top-down כמו הליתוגרפיה והמיקרומכונאות הנהוגות בתעשיות המיקרואלקטרוניקה וה-MEMS, עם טכניקות "bottom up" שבהן הרכיבים הבסיסיים נבנים אטום לאטום כפי שפיינמן חזה. בדומה לזרוע של פטיפון ישן שבקצה שלה

היו מרכיבים מחט חדה וזו שימשה לסריקת החריצים שעל גבי התקליט, כך ניתן כיום להרכיב או לגדל בקצה של קורת NEMS, שיוצרה לדוגמה מסיליקון בטכניקות ליתוגרפיה סטנדרטיות, מחט חדה לסריקת משטחים העשויה ננוצינורית דקיקה של אטומי פחמן, אותה מגדלים מגז של אטומים. קוטרה של ננוצינורית פחמן יכול להיות קרוב לננומטר בודד ואורכה יכול להגיע למספר רב של מיקרונים. בשל קוטרה הזעיר ותכונותיה המכניות והאלקטרוניות, שלא כאן המקום לפרטם, ננוצינורית הפחמן מהווה כיום אב-טיפוס לאבן בנין בסיסית ממנה מנסים להרכיב התקנים ננואלקטרומכניים מורכבים (ואפילו התקנים ננואלקטרוניים ללא פונקציה מכנית) (תרשימים 1-4). הרעיון של פיינמן לצרף אטום לאטום ליצירת מכונה שלמה הוא עדיין בגדר חזון, אך לא מן הנמנע שבעתיד תתפתח הטכנולוגיה אשר תאפשר הרכבת מבנים תלת-מימדיים מאטומים בודדים. כיום כבר ניתן בקלות יחסית למקם אטומים, כרצוננו, על פני משטחים בעזרת המחט שבקצהו של מיקרוסקופ מנהור סורק (STM)*. לעת עתה מרוכזים מרבית המאמצים בפיתוח (STM). השליטה החיצונית בגידולן של אבני בנין כגון ננוצינורית הפחמן, כך שניתן יהיה להנדס להן את התכונות הרצויות, ולשלבן במסגרת רכיבים המיוצרים על ידי ליתוגרפיה רגילה לכדי מכונה ננומטרית שימושית.

שלישית, קנה המידה הננומטרי הוא בעל חשיבות רבה מבחינה ביולוגית. גודלם של תאים ביולוגיים נמדד במיקרונים, כך שההתקנים הננומכניים עליהם אנו מדברים קטנים מתא בודד ולא גדולים בהרבה ממולקולה ביולוגית טיפוסית. בגודל כזה הם מהווים ממשק אידיאלי בין העולם הדומם לעולם החי, הפותח פתח ליישומים מהפכנים בתחומי הביולוגיה, הביוכימיה והרפואה. גם אם נשאיר לספרי המדע הבדיוני את הדיון ברובוטים זעירים דמויי אדם המשוטטים להם בתוך גופינו, עדיין נותר מקום רב לקיומם של התקנים ננואלקטרומכניים מציאותיים יותר, שיוחדרו לגופנו לביצוע משימות רפואיות מוגדרות, כגון הובלת תרופות ליעדים נקודתיים. יתר על כן, התקנים ננומכניים יאפשרו (ובמקרים מסוימים מאפשרים כבר היום) לבצע ניסיונות או בדיקות רפואיות ברמת התא או המולקולה הביולוגית הבודדים, וזאת במקום להשתמש במבחנה עם מספר אדיר של תאים או מולקולות. הציפייה ליישומים כאלה ואחרים גורמת כבר עתה לניפוץ הגבולות המסורתיים שבין הדיסציפלינות המדעיות השונות. אוניברסיטאות רבות בארץ ובעולם הקימו מרכזים רב-תחומיים לננוטכנולוגיה בהם עובדים יחדיו פיסיקאים, כימאים, מהנדסים, ביולוגים ואף רופאים. במספר מקומות הוקמו תכניות לימודים

* מרגונינסקי, י. מיקרוסקופ מנהור סורק ומיקרוסקופ כוח אטומי, תהודה (1) 18, עמ' 11-1, 1996

בין-תחומיות המשלבות את ההיבטים השונים הדרושים לתחום הננוטכנולוגיה. במספר אוניברסיטאות בעולם אף נשקלת ברצינות רבה השאלה אם לא הגיע הזמן לחדול מתכניות הלימודים הישנות ולהכשיר במקום זאת תלמידים עם מכלול היכולות הרב-תחומיות אשר תידרשנה למדען הטיפוסי במאה ה-21.

אתגרי המזעור

הרכיבים המכניים המצויים כיום בהתקני NEMS טיפוסיים הם פשוטים למדי – על פי רוב קורות המוחזקות בצדן האחד או בשני צידיהן, היכולות להתנדנד, להתכוּפף או להתפתל כתגובה לכוח חיצוני. למרות פשטותם הם עדיין אינם נמצאים בייצור תעשייתי, אלא רק במעבדות מחקר ספורות ברחבי העולם. התקנים מורכבים יותר כוללים בדרך כלל מערכים של קורות כאלה, או קומבינציות מתוחכמות אחרות של רכיבי הכיפוף והפיתול האלמנטריים. למרות שטרם קיימות יכולות ייצור של צירים ומנועים זעירים כפי שניתן לייצר בתחום ה-MEMS, כבר עתה ניתן לעשות הרבה עם הרכיבים הפשוטים יותר, מעצם העובדה שהם כה קטנים כך שתגובתם לכוח חיצוני מהירה יותר, ותדירות התנודות שלהם גבוהה יותר, באופן משמעותי ביחס לרכיבי ה-MEMS. רכיבים המיוצרים בשיטות ננוליטוגרפיה מתקדמות מגיעים כיום למימדי רוחב של עשרות ננומטרים, ובשילוב עם בניית bottom-up אף לננומטרים בודדים. תדרי התנודות (המכניות) שלהם הם בתחום הגיגהרץ – בדומה לקצבי השעון (האלקטרוני) שבמחשב האישי המתקדם ביותר.

קיים צורך להתגבר על מכשולים וקשיים רבים הקשורים לייצורם והפעלתם של הרכיבים הננומכניים הללו בטרם נוכל לראותם על פסי הייצור בתעשייה. רבים מהקשיים הם טכניים באופיים ופשוט נובעים מכך שהכל יותר קטן. אין ספק שעם הזמן והניסיון המצטבר יימצאו לקשיים הטכניים הללו פתרונות, בעיקר על ידי שיפור ואופטימיזציה של שיטות מוכרות. לעומת זאת, ישנם קשיים שהם ייחודיים לתחום הננומטרי ומהווים מכשול עקרוני ולא סתם טכני. לשם דוגמה, אם ברצוננו לבנות מתנד ננומכני לשקילת מולוקולות בודדות, כלומר כזה שתדירות תנודותיו תשתנה באופן מדיד אם תתוסף למסתו מסה של מולקולה אחת, אזי ברור שכל שינוי קטנטן בתהליך ייצורו של המתנד, בהכרח ישפיע עליו ועל תכונותיו. ברוב של כעשרה ננומטר, כל פגם קטן או שינוי במיקומם של כמה אטומים עלול להשפיע על ההתנהגות המכנית של ההתקן. המשמעות הנובעת מכך היא שיהיה זה כמעט בלתי אפשרי לייצר שני התקנים ננומכניים שיתנהגו באופן זהה – בעיה עקרונית עבור פס ייצור תעשייתי.

בעייה נוספת היא העובדה שככל שהתקן מכני הוא קטן יותר, כך הולך וגדל החלק היחסי של האטומים, המרכיבים אותו, הנמצא על שפתו. לדוגמה, עבור קורה ננומכנית, בעלת חתך ריבועי שעוביו ורוחבו כמה עשרות ננומטר, יכיל החתך כמה אטומים בלבד, מסודרים בכעשר שורות עם עשרה אטומים בכל שורה, כך שיותר משליש האטומים יימצא על שפת הקורה. במצב שכזה יש להקפיד בתהליך הייצור על שפות ללא פגמים שתהיינה חלקות ברמה האטומית, אחרת התנהגות ההתקן עלולה להיפגע באופן משמעותי – בעיה כמעט זניחה עבור התקנים מיקרומכניים. אכן, אחת הבעיות הנפוצות עבור רבים מן המתנדים הננומכניים היא שככל שהם קטנים יותר כך הולך ונפגם מקדם האיכות שלהם, כלומר מתקצר משך הזמן שעובר עד לדעיכת התנודות. הסיבה לתופעה זו אינה מובנת לגמרי, ומהווה מוקד למחקר עכשווי, אך ישנן עדויות מצטברות לכך שפגמים על פני השפה ממלאים תפקיד חשוב בפגיעה במקדם האיכות, ולכן הפגיעה הולכת וגדלה ככל שעולה חשיבותה של השפה.

לבסוף, קיימת בעייה של תקשורת עם הרכיבים של מכונה ננומטרית. במימדים של 10 ננומטר ותדירויות תנודה של כמה גיגהרץ, על הרכיבים המתקשרים עם המכונה לחוש תזוזות של פחות מננומטר בפחות מננושניה. גם כאן, הניסיונות לשיפור ואופטימיזציה של שיטות הנהוגות עבור מכונות MEMS לא תמיד מצליחים, משום שלא ניתן להתאים את כל השיטות הללו לסקלה הננומטרית. לדוגמה, ישנו קושי עקרוני להסתכל על אובייקט שהוא קטן מאורך הגל של האור בו משתמשים, או קטן מרוחב הסיב האופטי המוביל את האור. ישנה שיטה לנדנד קורות מיקרומכניות וננומכניות, המבוססת על הזרמת זרם חילופין דרך הקורה בנוכחות שדה מגנטי חיצוני, כך שפועל כח לורנץ המנדנד את הקורה בתדר של זרם החילופין. עבור קורות ננומכניות דקות במיוחד לא ניתן להשתמש בשיטה זו, משום שהזרם החלש ביותר עלול לחמם אותן עד כדי התכה.

המסקנה המתבקשת מכל הדוגמאות הללו היא שבמקרים רבים לא מספיק, או לא ניתן, לשפר שיטות קיימות על מנת להתגבר על בעיות המזעור בסקלה הננומטרית, ונדרשים רעיונות חדשים ומקוריים כדי להתגבר על אבני הנגף הניצבים בדרך. לדוגמה, רעיון חדשני כזה עומד במרכזה של שיטת המדידה, הרגישה ביותר כיום, לקביעת מיקומה של קורה ננומכנית המבצעת תנודות. הקורה הנעה מוחזקת במתח חשמלי קבוע ומתפקדת בתור השער המפעיל טרנזיסטור חד אלקטרוני (single-electron transistor – SET), הנמצא בקרבתה. המרחק של הקורה מן ה-SET קובע את מתח השער אותו הוא מרגיש, ומשפיע בצורה רגישה ביותר על

אלקטרומכניקה מזוסקופית

תחום הננו הוא ייחודי במובן נוסף שלא ציינו עד עתה. ההתקנים הננומכניים הם קטנים דיים כך שניתן, על ידי הקטנת הטמפרטורה, לעבור לתחום שבו חוקי הפיסיקה הקלאסית, הקובעים את התנהגותם של עצמים גדולים, מוחלפים בהדרגה על ידי חוקי הפיסיקה הקוונטית, הקובעים את התנהגותם של אטומים ומולקולות. תחום הביניים האפור הזה, שבין ההתנהגות הקוונטית לבין ההתנהגות הקלאסית, הוא התחום הקרוי "מזוסקופי". הפיסיקה המזוסקופית קיימת כתחום מחקר פעיל כבר יותר משני עשורים, אך היא התמקדה באופן כמעט בלעדי באלקטרונים. ההתפתחות הננוטכנולוגית של השנים האחרונות מאפשרת לנו לראשונה לבחון את ההתנהגות המכנית של עצמים בתחום המזוסקופי.

רבות מן התופעות המעניינות בפיסיקה המזוסקופית של אלקטרונים נובעות מן העובדה שבתחום הזה ניתן להתחיל להבחין בקוונטיזציה של המטען החשמלי – העובדה שמטען חשמלי נישא על ידי אלקטרונים, כאשר לכל אלקטרון מנה קצובה של מטען. אחת התופעות הללו היא החסימה הקולומבית, שהוזכרה קודם, שלא היתה מתאפשרת לו ניתן היה לייצר אלקטרונים עם מטען חשמלי קטן כרצוננו. תופעה דרמטית נוספת היא הקוונטיזציה של ההולכה החשמלית, אותה ניתן לראות באופן ניסיוני אם שולחים אלקטרונים בליסטיים (אלקטרונים הנעים בתווך שבו אין להם כמעט במה להתנגש) דרך מוליך מאוד צר. בשל הקוונטיזציה של פונקציות הגל האלקטרוניות לרוחב המוליך הצר, ניתן, בהפרש פוטנציאל קבוע, להעביר מספר סופי של אלקטרונים במקביל דרך המוליך הצר. אם מרחיבים את המוליך בהדרגה רואים שהמוליכות גדלה, אך לא באופן רציף. המוליכות קופצת במעין מדרגה בכל פעם שיש אפשרות להעביר במקביל אלקטרון שלם נוסף. כל "ערוץ הולכה" כזה שנפתח יכול להעביר לכל

היותר מנה קצובה של הולכה חשמלית שגודלה $\frac{2e^2}{h}$ כאשר e הוא מטען האלקטרון, h הוא קבוע פלנק, וה-2 נובע משני הכיוונים האפשריים של הספין של האלקטרון. כל ערוץ הולכה מאפשר בשל עקרון פאולי להעביר לכל היותר זוג אלקטרונים בעלי ספין הפוך. ההולכה בכל ערוץ יכולה להיות נמוכה יותר אם ישנה הסתברות לכך שהאלקטרונים יתנגשו במכשולים שונים בדרך (לכן נדרשים אלקטרונים בליסטיים על מנת לראות בניסוי את מדרגות ההולכה), אך לעולם לא גדולה יותר

מהמנה המקסימלית שגודלה $\frac{2e^2}{h}$.

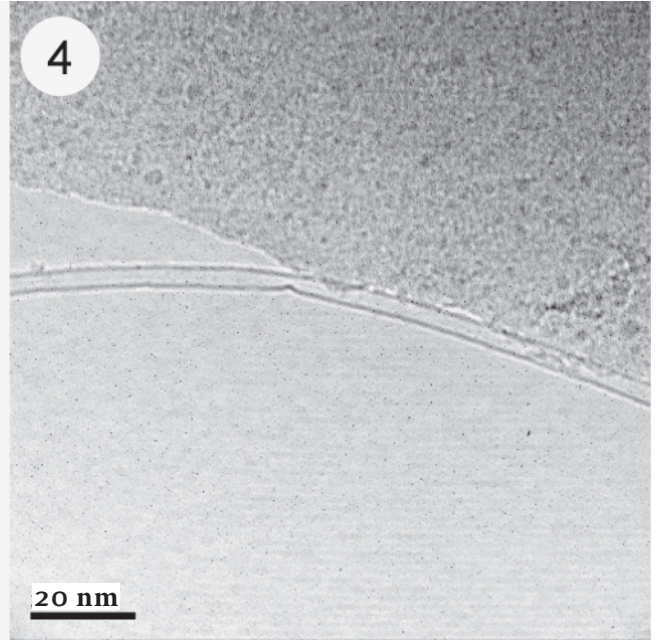
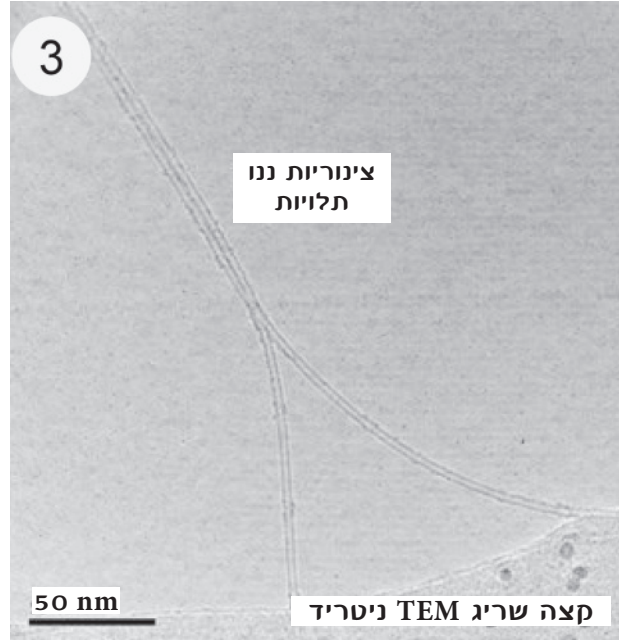
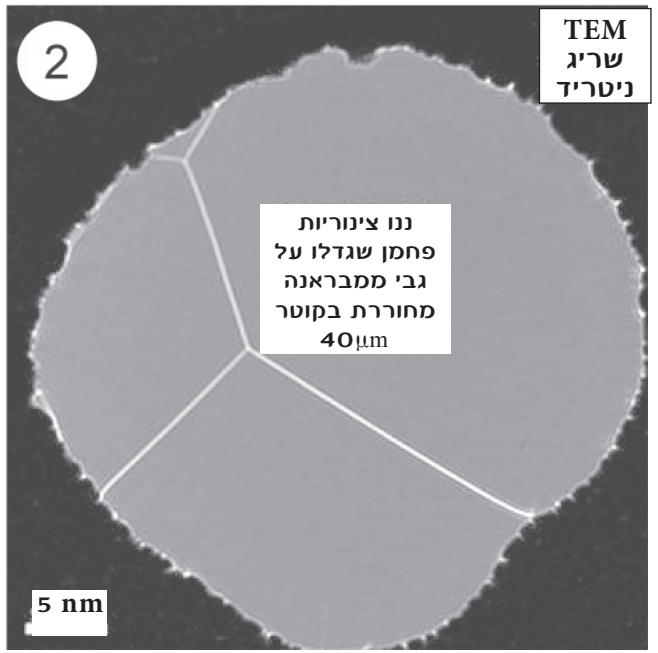
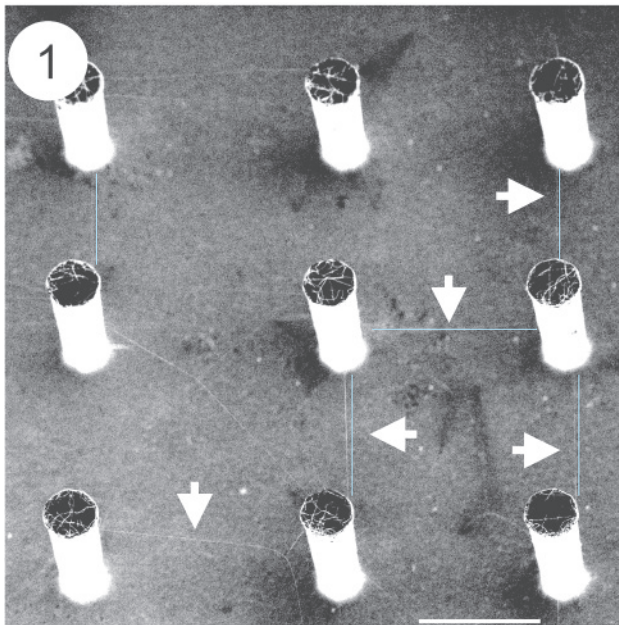
זרם האלקטרונים דרכו. בשיטה זו ניתן להגיע כבר היום, בהנחות מסוימות, לדיוק במדידת מיקום הקורה בדיוק הגדול פי שישה בלבד מאי הדיוק במדידה הנובע מעקרון אי הוודאות של הייזנברג. הטריזיסטור החד אלקטרוני מבוסס על אפקט החסימה הקולומבית (Coulomb blockade), שלא כאן המקום להסבירו, המהווה את אחת מאבני היסוד של הפיסיקה (או ליתר דיוק, האלקטרוניקה) המזוסקופית*. זוהי דוגמה אופיינית לתופעה פיסיקלית שנתגלתה והוסברה לא מכבר ומצאה את דרכה במהרה ליישום מעשי. לא מן הנמנע שרבים מהפתרונות למכשולים, הניצבים כיום בדרך לפיתוח מכונות ננומטריות, יגיעו בשנים הקרובות מתגליות מדעיות חדשות שתהיינה תולדה של מחקר בסיסי ויסודי מאומץ.

התאמת גודלן של הננומכונות העתידיות לגודלם של תאים ביולוגיים, שהוזכרה קודם כפוטנציאל ליישומים ביו רפואיים מרתקים, יכולה לבוא לעזר בהתמודדות מול מכשולי היישום הנוכחיים. שנים ארוכות של ניסוי ותעייה אבולוציוניים הביאו להיווצרותן של מכונות ביולוגיות רבות בסקלה הננומטרית. שתי דוגמאות לכך הן המנוע המסובב את השערות הדקיקות שעל פני יצורים חד תאיים המיועדות להנעתם בתווך נוזלי, והמנועים האחראים לשינוע החומר הגנטי לשני צידי התא בעת חלוקתו. בשני המקרים אלו רכיבים ננומכניים הפועלים בייעילות רבה ועשויים להוות השראה ומודל לחיקוי בבואנו ליצר מכונות ללא רוח חיים. אפילו אם הפתרון לא יגיע במדויק מעולם החי, עצם העובדה שהאבולוציה השכילה לייצר ננומכונות מסוגים שונים מוכיחה שניתן באופן עקרוני להתגבר על המכשולים, ומעניקה עידוד למאמצי הפיתוח. האנלוגיה המתבקשת היא כלי התעופה בהם אנו משתמשים, המחקים באופן חלקי בלבד את מעופן של הציפורים, למרות שאין ספק שציפורים היוו מקור השראה ודחיפה משמעותי לפיתוחם.

הננוטכנולוגיה בשרות המדע

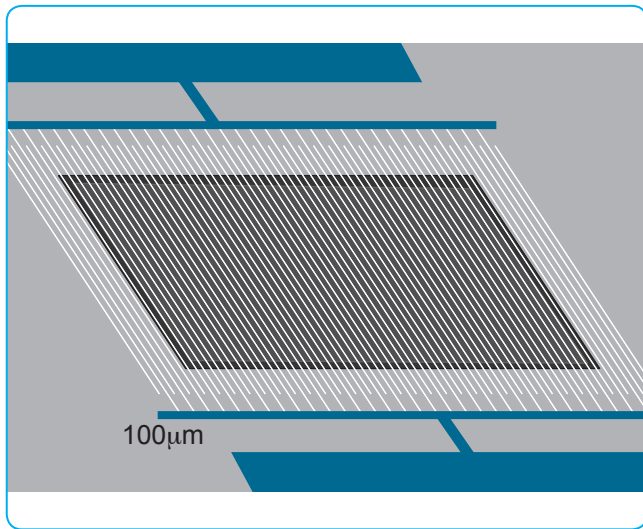
התקדמות המדע בעשורים האחרונים אפשרה את הפריחה הנוכחית של הננוטכנולוגיה, וכפי שתיארנו לעיל תהווה מרכיב חשוב בהמשך פיתוחן של ננומכונות. מאידך, ההתקנים הננואלקטרומכניים הקיימים כיום (ואלו הצפויים בעשור הקרוב) יאפשרו לנו לחקור תחומים חדשים בפיסיקה שעד לא מכבר לא הייתה לנו גישה אליהם. אני אסיים מאמר זה בתיאור דוגמאות, הלוקחות מתחומי המחקר בהם עוסקת קבוצת המחקר התאורטית שלי באוניברסיטת תל אביב.

* הייבלום, מ., פיסיקה מזוסקופית, תהודה (3)15, עמ' 72, 1993.



תרשימים 1-4: בשל מימדיהן הזעירים, לננו-צינוריות פחמן נטייה חזקה להיות מושפעות מסביבתן הקרובה, אם בשל משיכה לננו-צינוריות נוספות, או בשל קרבה לדפנות של פני חומר. תמונות אלו, באדיבותם של דר' יעל חנין ותלמיד המחקר שלה זאב אברמס, מהמרכז לננוטכנולוגיה וביה"ס להנדסת אלקטרוניקה באוניברסיטת תל-אביב, מדגימות את יכולתם המתקדמת בגידול ושליטה בננו-צינוריות שכאלה.

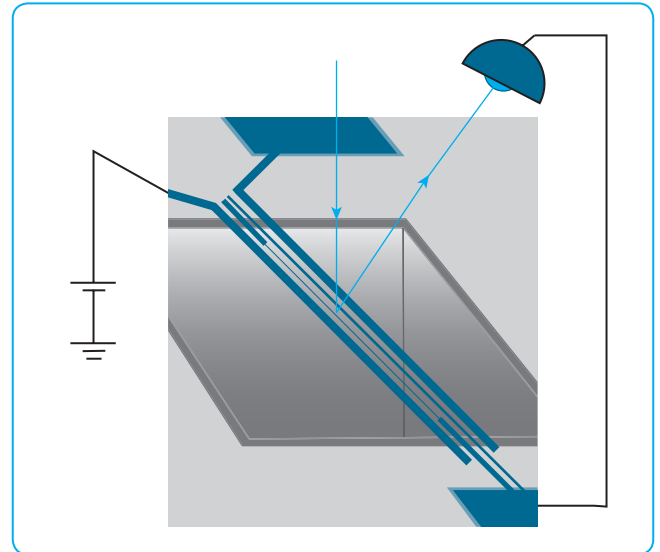
1. תמונת מיקרוסקופ אלקטרוני סורק SEM של רשת מסודרת של ננו-צינוריות הנמתחות על גבי מערך עמודי סיליקון כמו חוטים בין עמודי חשמל.
2. ננו-צינוריות שגדלו על גבי ממבראנה מחוררת. הצינוריות נמתחות כתוצאה מהמשיכה ביניהן.
3. תמונת מיקרוסקופ TEM דרך אחד החורים בממבראנה חושף את המשיכה החזקה שבין שתי צינוריות.
4. בקצה החור ניתן לזהות משיכה חזקה של הצינורית לפני השטח. כוח המשיכה חזק דיו כדי לגרום לצינורית להתעוות. אורך קנה המידה בתמונה זו הוא 20 ננומטר.



תרשים 6 הוא מערך של 67 קורות זהב כמו זו שבתרשים המתוחות מעל חור מלבני, באדיבות ד"ר אייל בוקס מהמרכז לננואלקטרוניקה בטכניון. אחת המטרות שבשימוש במערכים הכוללים מספר רב של מתנדים הוא לנצל מצד אחד את גודלו הזעיר של כל מתנד על מנת להגיע לתדירויות תנודה גבוהות במיוחד, ומצד שני לנצל את תנועתם המתוזמנת של הרבה מתנדים כדי להגביר את עוצמת האות שנוצר.

בשנת 2000 בוצע לראשונה, במכון הטכנולוגי של קליפורניה, ניסוי למדידת הולכת החום דרך קורות ננומכניות בתחום המזוסקופי. אלו היו קורות ברוחב של 200 ננומטר ועובי של 20 ננומטר שלאורכן יכלו הפונונים לנוע באופן בליסטי, כלומר כמעט ללא הפרעה. בדומה לניסוי עם האלקטרונים, גם כאן בשל הקוונטיזציה של פונקציות הגל (אופני התנודה) לרוחב הקורות ישנו תמיד מספר שלם של ערוצים להולכת תנודות מכניות לאורך הקורה – דהיינו מספר שלם של ערוצים להולכת חום. ניתן להראות על ידי חישוב תאורטי, שכל ערוץ יכול להעביר לכל היותר מנה קצובה של הולכת חום שגודלה $\pi^2 k_B^2 \frac{T}{3h}$, כאשר T היא הטמפרטורה הממוצעת משני צידי הקורה. אכן, בניסוי עצמו, בטמפרטורות שמתחת לכעשירית הקלווין היו כל הערוצים קפואים ($\bar{n} \approx 0$), פרט לארבעת הנמוכים ביותר, וניתן היה להראות במדויק שכל אחד מארבעת ערוצים אלו תרם $\pi^2 k_B^2 \frac{T}{3h}$ להולכת החום הכוללת דרך הקורה. ניסוי זה, מעבר להיותו אימות לעובדת התנהגותן הקוונטית של התנודות המכניות, עשוי להיות בעל חשיבות מעשית בתכנון התקנים ננומכניים בהם ישנו צורך להיפטר מחום עודף, שכן הוא מצביע על כך שישנה מגבלה קוונטית על קצב הולכת החום דרך התקנים קטנים במיוחד. ההדגמה הניסיונית של הקוונטיזציה של הולכת חום דרך קורות

החלקיקים הקוונטיים המתארים תנועה מכנית הם חלקיקי הקול הקרויים פונונים. נשאלת השאלה האם ניתן באמצעות התקנים ננומכניים בטמפרטורות נמוכות לצפות בהתנהגות המזוסקופית של פונונים – האם ניתן להשיג עדות ניסיונית לקיומם של חלקיקי קול? בדומה לחלקיקי האור, הפוטונים, גם הפונונים, הם חלקיקים קוונטיים המתנהגים לפי הסטטיסטיקה של בוזא ואינשטיין, כלומר שלא חל עליהם עקרון פאולי האוסר על שניים מהם להיות באותו מצב קוונטי. כל אחד מאופני התנודה הנורמליים של התקן מכני, בעל צורה כלשהי, מאוכלס באופן כללי על ידי מספר שלם n כלשהו של פונונים. פונקצית הגל של הפונון היא פשוט הצורה המרחבית של אופן התנודה הנורמלי. לכל פונון מנת אנרגיה קצובה $h\nu$ הנקבעת על פי תדירות התנודות ν בהרץ (Hz) של אותו אופן תנודה נורמלי. האנרגיה הכוללת הנמצאת באופן תנודה המכיל n פונונים הינה $E = (n + \frac{1}{2})h\nu$, ומספר הפונונים הממוצע \bar{n} באופן התנודה, בשיווי משקל בטמפרטורה T , ניתן על-פי התפלגות בוזא-אינשטיין $\bar{n} = (\exp[\frac{h\nu}{k_B T}] - 1)^{-1}$, כאשר k_B הוא קבוע בולצמן. ככל שהטמפרטורה גבוהה יותר כך גדל האכלוס הממוצע של הפונונים בכל אחד מאופני התנודה – הטמפרטורה של גוף מכני היא מידה לעוצמת התנודות שבו.



תרשים 5 מראה קורת זהב אלסטית מתוחה מעל חור ריבועי, באדיבות ד"ר אייל בוקס מהמרכז לננואלקטרוניקה בטכניון. הקורה בעובי של 250 ננומטר, רוחב של 240 ננומטר ואורך של 200 מיקרון היא הפס הדקיק שבקושי נראה במרכז התמונה. משני צידיה קורות עבות בהרבה המשמשות להפעלת כוחות חשמליים למתיחת הקורה ולנדנודה כמו מיתר זעיר של כינור. את התנודה מודדים באמצעות אלומת אלקטרונים המוקרנת לעבר הקורה ומוחזרת בחלקה לתוך גלאי מיוחד.

ליצור שזירה (entanglement) של שני רכיבים ננומכניים שונים, בדומה לזוג הפוטונים המפורסם של אינשטיין, פודולסקי ורוזן, כך שאם נמדוד את הראשון נשפיע על מצבו של השני. בשלב הזה אנחנו חושבים על הניסויים הללו רק באופן תאורטי. אם הם ימצאו את דרכם למימוש במעבדה אין ספק שהדבר יגרום לפרץ אדיר של פעילות מדעית אינטנסיבית שמצד אחד תיתן מענה לשאלות יסוד בתורת הקוונטים – כגון סוגיית המדידה הקוונטית, והאופן שבו מערכת קוונטית מאבדת את הקוהרנטיות שלה כתוצאה ממגעה עם סביבתה – ומצד שני תהווה מקור ליישומים טכנולוגיים מהפכניים.

מראי מקום ולקריאה נוספת:

1. R.P. Feynman, Plenty of room at the bottom, (1959) <http://www.its.caltech.edu/~feynman/plenty.html>.
2. M.L. Roukes, Plenty of room indeed, Scientific American 285, September 2001, pp. 48-57.
3. H.G. Craighead, Nanoelectromechanical systems, Science 290, 2000, pp. 1532-1535.
4. M.L. Roukes, Nanoelectromechanical systems face the future, Physics World, 14, 2001, pp. 25-31.
5. A. Cho, Heat flow runs into quantum limit, Science 288, 2000, pp. 591-592.
6. A. Cho, Researchers race to put the quantum into mechanics, Science 299, (2003) pp. 36-37.
7. K.C. Schwab and M.L. Roukes, Putting mechanics into quantum mechanics, Physics Today, 58, July 2005, pp. 36-42.

מאמר זה מבוסס על ההרצאה "אנשים גדולים ומכונות זעירות הננוטכנולוגיה מנקודת מבטו של פיסיקאי", שניתנה לפני כשנה באוניברסיטת תל אביב במסגרת ארועי שנת הפיסיקה העולמית, והוקדשה לזכרה של פרופ' חוה ליפשיץ, 1936-2005. ניתן לצפות בהקלטת וידיאו של ההרצאה דרך קישורית הנמצאת באתר האינטרנט שכתובתו: http://www.astroclub.tau.ac.il/video_h.html

תהודה

ננומכניות היוותה הישג חיוני לביסוס המכניקה המזוסקופית כתחום מחקר נגיש מבחינה ניסיונית. כיום אנו חוקרים תופעות נוספות בתחום זה, הן באופן תאורטי והן באופן ניסיוני. בפרט, יש כיום דגש על חקר מערכות אלקטרומכניות מזוסקופיות בהן גם האלקטרונים וגם הפוטונים נמצאים בתחום האפור שבין הפיסיקה הקלאסית לפיסיקה הקוונטית.

אלקטרומכניקה קוונטית

אם מבחינה ניסיונית נכנסנו כבר לעידן האלקטרומכניקה המזוסקופית, אז ודאי שכתאורטיקנים מותר לנו כבר להתחיל לחשוב על עידן האלקטרומכניקה הקוונטית, שזהו תחום נוסף בו אנו עוסקים. הכוונה כאן היא לתחום שמעבר לאפור שבו ההתקנים הננואלקטרומכניים יתפקדו לגמרי על פי כללי תורת הקוונטים. אחת הדרישות שיש לקיים על מנת להגיע לתחום הקוונטי גם באופן ניסיוני הינה להקפיד את התנודות התרמיות בכל אופני התנודה כך שעבור כולן האיכלוס הממוצע \bar{n} יהיה קרוב לאפס, כלומר $k_B T \ll \hbar \nu$. במצב כזה האנרגיה של כל אופן תנודה תהיה אנרגיית היסוד $E = \frac{\hbar \nu}{2}$. זה בשונה באופן מהותי מאנרגיית היסוד הקלאסית שהיא אפס – בשל עקרון אי-הוודאות המתנד הקוונטי לעולם לא יהיה במנוחה מוחלטת. עבור מתנד ננומכני שתדירות התנודה הבסיסית שלו היא גיגהרץ יש לרדת מתחת לטמפרטורה של 50 מיליקלווין על מנת לקיים את דרישת ההקפאה של התנודות התרמיות. 50 מיליקלווין היא טמפרטורה שניתן להשיג במעבדות של ימינו, כך שזו רק שאלה של זמן עד שניתן יהיה באותה מעבדה לייצר התקן קטן מספיק, בטמפרטורה נמוכה מספיק, שניתן למדוד בדיוק מספיק כדי לחזות בהתנהגותו הקוונטית.

כשנגיע למצב זה נוכל לנסות לראות במפורש את הקוונטיזציה של אמפליטודת התנודה, אשר אמורה לגדול או לקטון באופן דיסקרטי בכל פעם שמספר הפוטונים, המאכלסים את אופן התנודה, גדל או קטן באחד. נוכל לנסות ולהכניס התקן ננומכני לסופרפוזיציה קוונטית של שני מצבים מכניים שונים. קורה קלאסית יכולה להיות מכופפת לצידה האחד או לצידה השני. קורה קוונטית יכולה להיות בסופרפוזיציה – פונקציית גל שהיא קומבינציה לינארית של שני המצבים הקלאסיים. רק אם נמדוד לאן מכופפת הקורה "נכריח" אותה לבחור צד. נוכל גם לנסות