



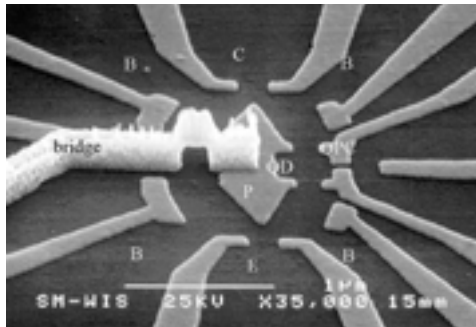
העולם המזו־ננוסקופי - מדוע הוא מעניין?

א. הקדמה

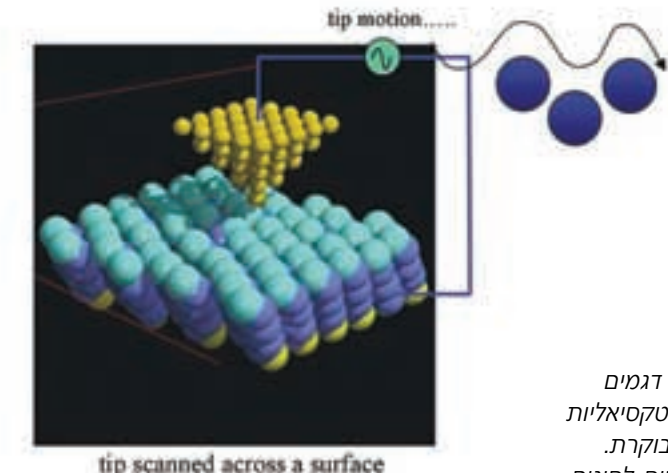
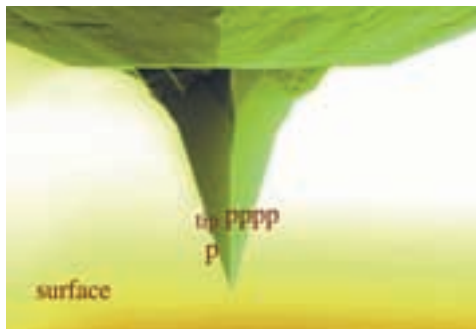
החומר בטבע בנוי מאטומים המחוברים זה לזה בקשרים כימיים למיניהם. אימא־טבע מוצאת את הדרך להרכיב ולבנות את המבחר העצום של מערכות המבוססות על יחידות אלו. נתאר לעצמנו את הניסוי המחשבתי הזה: נבנה גביש של חומר מקרוסקופי רגיל. נתחיל באטום אחד, שניים, וכך הלאה עד שנגיע לגבול של גביש שאותו אנו מכירים מחיי היום־יום, שאפשר להשתמש בו גם לצרכים רגילים. כך עברנו מסקאלת הגדלים המיקרוסקופיים לסקאלה המקרוסקופית. שתי שאלות בסיסיות מתבקשות כאן: (1) באיזה שלב תעבור התנהגות הגבישון שבנינו מאטומית למיקרוסקופית? (2) האם אפשר לקבל בדרך תחומי ביניים שבהם יש לחומר תכונות חדשות ומעניינות?

התשובה לשאלה הראשונה אינה כללית אלא תלויה בתכונת החומר הפרטנית שעליה מדובר ובתנאי הניסוי, כגון הטמפרטורה שבה עושים אותו. התשובה לשאלה השנייה היא חיובית. העניין וההתרגשות הרבה שעוררה הפיזיקה המזוסקופית בעשרים השנים האחרונות נבעו מכך שבסקאלות הביניים המזוסקופיות (בדרך כלל גדלים של כעשרות עד אלפי אטומים) אפשר לבדוק את המערכות באמצעים מקרוסקופיים רגילים (כגון מכשירי מדידה חשמליים), אולם את התכונות שהם יגלו יכתיבו החוקים המיקרוסקופיים, דהיינו אותם חוקים השולטים בפיזיקה אטומית ומולקולרית (וכמובן, בסקאלות התת־אטומיות, שבהן לא אדון כאן).

ניסוי זה אינו בהכרח רק ניסוי מחשבתי. בעת האחרונה שוכללו שיטות המאפשרות לגדל חומרים שכבה מעל שכבה (ציור 1), לטפל בשכבות האלה ולתת להן צורות רצויות (ציור 2), וכן להניח את האטומים זה אחרי זה ולבנות על המשטח את ההתקן הרצוי (ציורים 3,4).



ציור 2 דגם לניסוי של איבוד פאזה מבוקר (תמונת מיקרוסקופ אלקטרוני סורק של אייל בוקס ושותפיו)

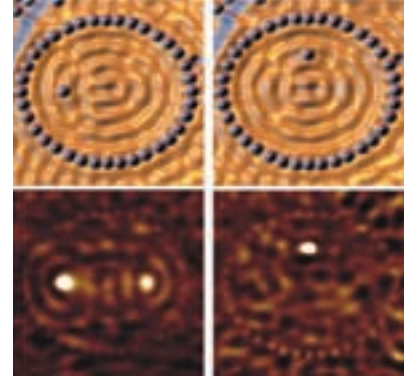


ציור 3 מיקרוסקופ מנהור סורק



ציור 1 אפיטקסיה בקרניים מולקולריות. מערכת לגידול ולאגירה של דגמים בתוך תא ואקום גבוה במיוחד, שנועדה לגידול מבוקר של שכבות אפיטקסיליות (המתאימות לפני השריג שמתחתן) זו מעל זו בדרגת ניקיון גבוהה ומבוקרת. שכבות כאלה המיוצרות בשיטה זו או בשיטות קפדניות פחות הן הבסיס לסגים רבים של התקנים מוליכים למחצה. המערכת שבציור, במרכז בראון במכון ויצמן, משמשת לגידול גבישים ממשפחות Ga Al As¹ Ga As.





ציור 4

"Kondo Mirage"
(ד' איילר ושותפיו,
מעבדות אייבי-אם,
אלמדן). מערכים
אליפטיים של אטומים
מעשה ידי אדם על פני
משטח מתכתי שהוכנו

ונצפו בעזרת מיקרוסקופ מנהור סורק. סיג מגנטי הונח בתוך תחום הגדר האטומית בנקודות רצויות, והודגמו כמה תופעות גליות מעניינות, כגון יצירת "רמות" מדומה של הסיג שהונח במוקד אחד של האליפסה על פני המוקד האחר. ראו http://www.almaden.ibm.com/almaden/media/image_mirage.html

המערכות המזוסקופיות מספקות לנו מעבדה שבה נוכל לבדוק עקרונות יסוד של הפיזיקה הקוונטית על ידי ניסויים שאינם מסובכים מדי. מעבדה כזאת גם מאפשרת לנו לחקור את השאלה היסודית כיצד בדיוק משתנה ההתנהגות של המערכת כפונקציה של גודלה, מקוונטית לקלסית. פן נוסף וחשוב של הפיזיקה המזוסקופית קשור בעולם השימושים. כידוע, השאיפה למזעור שולטת בתעשייה האלקטרונית. המזעור של רכיבים אלקטרוניים הוא שאפשר לתעשייה זו להקטין בתוך פחות מחמישים שנה את אורכם של רכיבי מחשב בכארבעה סדרי גודל (ואת מחירם בכשמונה סדרי גודל). מזעור זה הפך את המחשב רב העצמה ממכשיר המיועד ליחיד סגולה לחלק מסגנון החיים היומ-יומי של אוכלוסיות גדולות בעולם.

בעתיד הקרוב יגיע המזעור הזה לסקאלות שבהן תשלוט תורת הקוונטים בטמפרטורת הפעולה של המערכת, ואז ישתנו לגמרי כללי המשחק. לכן יש עניין מעשי רב כל כך בפיזיקה המזוסקופית. אכן, ענף זה של המדע ייחודי בכך שהוא משלב מחקר בסיסי ברמה הגבוהה ביותר עם שאלות שבקרוב תהיה משמעותן השימושית אדירה. נוסף על שימושים בננו-אלקטרוניקה אפשר לצפות גם לשימושים חשובים בכימיה: תהליכי זירוז (קטליזה), טיהור מים, פיתוח חומרים חדשים, ננו-מכניקה ואף שימושים ביולוגיים.

ב. תופעות מזוסקופיות מעניינות

במערכות המצייתות לחוקים הקוונטיים ידוע כי גדלים מסוימים, כגון האנרגיה של מערכת נתונה, הם גדלים "מקוונטים". פירוש הדבר הוא כי במצב יציב של המערכת הם אינם יכולים לקבל כל ערך, אלא רק סדרה בדידה של ערכים ("רמות האנרגיה" של המערכת הנתונה). אולם המדענים לא ציפו כי גדלים יום-יומיים יותר, כגון ההתנגדות החשמלית או המוליכות של מערכות נתונות, אף הם יהיו "מקוונטים". בשנת 1982 מצאו Von-Klitzing ושותפיו כי מוליכות מסוימת הקרויה "מוליכות הול" במערכות של מוליכים למחצה דו-ממדיים מקבלת בתחומים נרחבים של הפרמטרים סדרה בדידה של ערכים (הצורה הטובה ביותר ליצורם היא בעזרת גידול אפיטקסיאלי בקרניים מולקולריות - ציור 1 - של גבישים מסוימים זה על גבי זה). יתרה מזו, הם מצאו שערכים אלו הם כפולות שלמות של "יחידת המוליכות הקוונטית" e^2/h (e הוא מטען האלקטרון ו-h הוא קבוע Planck - הקבוע היסודי של תורת הקוונטים). הדיוק של הערכים האלה גבוה כל כך עד שהוא מאפשר להשתמש בהם כבסיס לתקני מוליכות מדויקים מאלו שהיו קיימים קודם לכן.

אולם מוליכות הול מסובכת יותר מהמוליכות הרגילה שבה חשמלאי מתעניין כשהוא בודק מכשיר חשמלי ביתי. אנו יודעים כי מוליכות זו אינה מקוונטת במערכות מקרוסקופיות. דוגמה יפה למערכת מזוסקופית (ולמעשה ננוסקופית) היא קשר דקיק בין שני מוליכים. קשר די דקיק שכזה יכול להיווצר במוליכים למחצה בשיטות שזכרו לעיל. כמו כן כאשר שוברים צומת בין שתי מתכות באופן מבוקר אפשר להגיע למצב שהן מחוברות על ידי אטום בודד או על ידי כמה אטומים המהווים את הקשר הרצוי. נהוג לכנות מערכת כזאת "מגע קוונטי נקודתי" (quantum point contact).

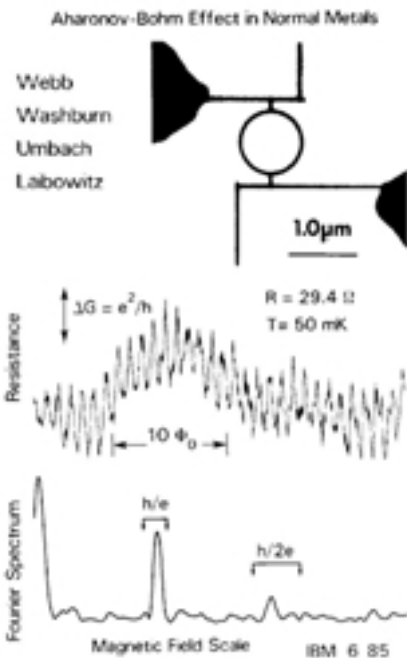


ציור 5

אירועי טעינה בדידים
בגז אלקטרוניים
דו-ממדי מדולל אשר
יוצר באורח ספונטני
אזורים טעונים
מבודדים (הקווים

השחורים באיור) בתוך הרקע המוליך. המובאה מראה סכמה של הטרנזיסטור הננוסקופי שבו השתמשו החוקרים למדידה (ש' אילני ושותפיו).

שיטות אלו אף מאפשרות לבדוק תכונות חשמליות של המשטח הנ"ל (ציור 5) בסקאלות אורך המגיעות לעשרות אטומים, ובעתיד הנראה לעין יגיעו גם לאטומים בודדים. החוקים המיקרוסקופיים מבוססים כמובן על תורת הקוונטים - אותה דיסציפלינה בלתי אינטואיטיבית אשר פותחה במחצית הראשונה של המאה הקודמת כדי להסביר את התכונות בסקאלה האטומית. זוהי כמובן אותה תורה אשר מדענים כאלברט איינשטיין סירבו להאמין כי היא נכונה.



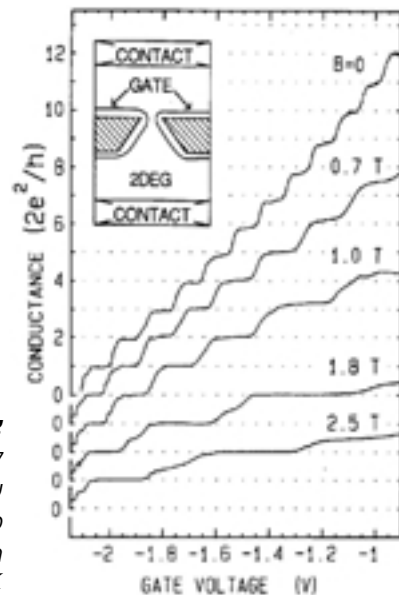
ציון 6ל תנודות AB בטבעות זהב מזוסקופיות (Webb ושותפיו).

מאחר שאם מוסיפים לפאזה כפולה של 2π ההתאבכות חוזרת לעצמה, צפויה תלות מחזורית בשטף המגנטי. מתברר כי המחזור הוא יחס אוניברסלי בין שני קבועי טבע - h/e (יחידת השטף הקוונטית) - ואינו תלוי בתכונות אחרות של המערכת (לעומת זאת, גודל האפקט אינו אוניברסלי וניתן לשינוי). אף שהתופעה הזאת נובעת באופן ישיר ופשוט למדי מחוקי המשחק הקוונטיים, היא בלתי אינטואיטיבית מאוד, ועל כן סירבו מדענים רבים להאמין בה. מספרם של אלה פחת בהרבה לאחר האישרים הניסויים של התופעה. אכן, באשר לאלקטרונים בוואקום (וכזה המצב במערכות מסוימות של מיקרוסקופים אלקטרוניים) כיום אין ספק כי התופעה קיימת. שיקולי אהרונב־בוהם הוכחו כרלוונטיים להבנת הקוונטיזציה של אפקט הול וכן להבנת כמה נושאים חשובים בפיזיקה של המאה העשרים.

מה באשר לאלקטרונים הנעים בחומר מוליך? לכל חומר מוליך רגיל יש התנגדות חשמלית לתנועת נושאי המטען, האלקטרונים. התנגדות זו נקבעת על ידי הסטיות של החומר ממבנה גבישי אידאלי, כגון סיגים ותנודות הגביש. הדעה השלטת הייתה כי הפאזה של פונקציית הגל האלקטרונית נשטפת ונעלמת לחלוטין לאחר פיזורים כאלה, ולכן אין לצפות לתופעת אהרונב־בוהם במוליכים אלא בסקאלות הקטנות ממרחק הפיזור, שבהן קשה מאוד לעשות ניסויים.

המחקר בתחילת שנות השמונים הוביל להכרה כי יש לדון בפיזורים דיון יסודי יותר. מתברר שיש שני סוגי פיזורים: פיזורים אלסטיים - שבהם המצב הקוונטי של המפזר נשמר; ופיזורים לא-אלסטיים - שבהם הפאזה נעלמת (נוצרת אינקוהרנטיות). רק הפיזורים מהסוג השני הורסים את הפאזה של פונקציית הגל, ואילו הפיזורים מהסוג הראשון רק משנים אותה, אך היא נשארת מוגדרת היטב. לכן

בשנת 1985 מצאתי כי בתנאים אידיאליים מסוימים המוליכות של מערכת כזאת אף היא מקוונטטת ביחידות לעיל (e^2/h). כעבור כשלוש שנים נצפתה התופעה באופן ניסיוני במגעים קוונטיים נקודתיים במערכות מוליכות למחצה (ציון 6), לאחר מכן גם במערכות מתכתיות.

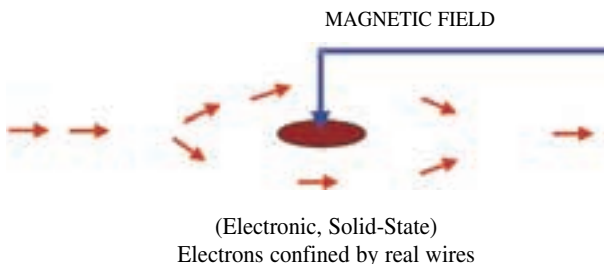


ציון 6

קוונטיזציה המוליכות של מגע קוונטי נקודתי כפונקציה של מתח השער לשדות המגנטיים. $T=0.6 K$

תנודות אהרונב־בוהם

בשנת 1959 מצאו יקיר אהרונב ודוד בוהם כי ממשוואות תורת הקוונטים עולה כי לשדה מגנטי יש השפעה על חלקיקים טעונים גם כאשר הוא מופעל באזורים שבהם אין חלקיקים. הסיבה היא שהשדה משפיע כך על הפאזה של פונקציית הגל של החלקיקים הטעונים. שינוי פאזה זה משנה את ההתאבכות של חלקיק כזה עם עצמו - התופעה המרכזית המבחינה בין התנהגות קוונטית להתנהגות קלאסית. כאשר שני מסלולים שבהם האלקטרון יכול לנוע מתפצלים בנקודה ומתחברים מחדש בנקודה אחרת - הפאזה תלויה בשטף המגנטי דרך השטח בין שני המסלולים ושתי הנקודות לעיל (ציון 7a).



(Electronic, Solid-State)
Electrons confined by real wires

ציון 7a

אינטרפרומטר AB מזוסקופי (סכמטי). הגל האלקטרוני בא משמאל, מתפצל לשני גלים חלקיים הסובבים את השטף המגנטי ומתחברים מחדש לתיל היציאה.

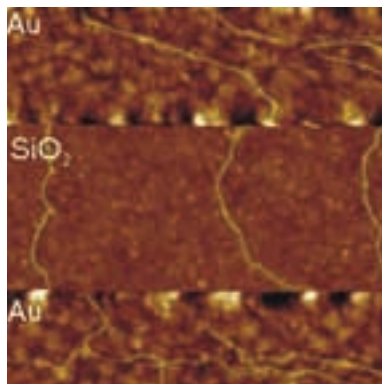
ג. מערכות ננומטריות ושימושיהן האלקטרוניים הצפויים

החוקרים חוזים שימושים רבים ומגוונים למערכות ננומטריות. יש גם רעיונות לשימושים מכניים, כימיים ואף רפואיים, וכן ליצירת חומרים בעלי תכונות חדשות. אדון בעיקר בשימושים האלקטרוניים הצפויים.

אפשר לחשוב על שלוש דרכים עיקריות (ועל צירופיהן) ליצור מערכות זעירות:

(א) דרך המבוססת על טכנולוגיות מתחום המוליכים למחצה, ובה אנו מעבדים חומר מקרוסקופי על ידי מגוון של שיטות חיתוך, איכול מבוקר וכדומה, עד שמגיעים לצורה הרצויה. דגמים כאלה שיוצרו בשיטה הנקראת top-down מופיעים בציורים 2, 7b.

(ב) אנו מתחילים מסקאלות קטנות ובונים מהן את ההתקן הרצוי (bottom up) ולשם כך אפשר להתחיל ממולקולות ארוכות למדי, כגון דנ"א (ציור 9) או ננוצינורית (nanocube) של פחמן (ציור 10), אשר אפשר להניח בין מגעים מתכתיים ולשלוט בתכונותיהן על ידי שדות חשמליים (ואולי מגנטיים). במקרה של דנ"א יש יתרון נוסף, כפי שהודגם בעבודותיהם של בראון, אייכן וסיון. אפשר להשתמש ביכולות של מולקולות כאלה לזהות בסיסים משלימים ולכן להתחבר למקומות רצויים. בצורה כזאת הדגימו החוקרים יצירה של רשתות פשוטות במבנים רצויים ובסקאלות ננומטריות.



ציור 9

מולקולות דנ"א
המגשרות אלקטרודות
מוליכות (דקר ושותפיו,
דלפט)

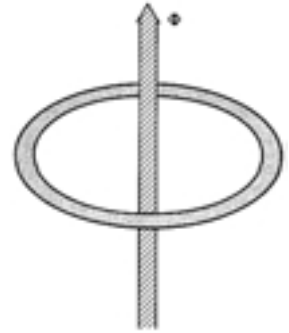
<http://www.mb.tn.tudelft.nl/SingleDNAmolexp.html> 1X7

חלק מהמחקר העכשווי נסוב על מתן הולכה חשמלית נשלטת למולקולות אלו, ויש כבר התקדמות. לננוצינוריות של פחמן הולכה משלהן, ואכן כבר הודגמה פעולת טרנזיסטור בהתקנים הדומים לזה שבציור 10, אולם עדיין אין שיטה טובה לייצור מבוקר של ההתקן. אלמנט מעניין אחר הוא היכולת להשתמש בגרגרים מתכתיים או כמעט מתכתיים קטנטנים ובעלי גודל מוגדר (כמו גרגר זהב בעל 55 אטומים בדיוק, שלא לדבר על מולקולות כמו fullerene-C60 ודומותיה). קיימות גם התפתחויות מעניינות ביכולת ליצור מגע חשמלי מבוקר עם מולקולות שונות באמצעים כימיים. אין ספק כי לא רחוק היום שבו טרנזיסטור מולקולרי יהיה אפשרות נוחה וראלית. יצירת מערכים מסובכים של טרנזיסטורים כאלה עלולה להתברר כבעיה קשה עוד יותר.

(ג) הדרך המדהימה ביותר ליצירת התקנים ננומטריים היא שימוש במיקרוסקופי הסריקה - בעיקר Scanning Tunneling Microscope

מתברר כי בטמפרטורות נמוכות האלקטרוניים יכולים לעבור טווחים גדולים יחסית ולהישאר קוהרנטיים. ההבנה של איבוד הקוהרנטיות וכיצד אפשר להשפיע עליו היא אחד הנושאים החשובים בענפים רבים של הפיזיקה. במאמר מוסגר אוסיף שהפיזיקה המזוסקופית סיפקה אפשרויות וכלים טובים לטיפול בבעיה זו. לדוגמה, ההתקן בציור 2 שימש בסיס לניסוי שעשו אייל בוקס ושותפיו במרכז התת-מיקרוני ע"ש בראון במכון ויצמן למדע שאפשר לשלוט באיבוד הקוהרנטיות באופן מבוקר.

מהאמור לעיל נובע כי בטבעת מתכתית בגודל של כמיקרון (חלק 10⁴ של סנטימטר) אפשר לראות תופעות של התאבכות אלקטרונית קוונטית בטמפרטורות של כמה מעלות מעל האפס המוחלט, כיום טמפרטורות סטנדרטיות יחסית. עם Lendauer ו-Buttiker מצאתי כי בטבעת כזאת המנותקת מהעולם החיצוני (ציור 8) יגרום שדה אהרונוב-בוהם להיווצרות זרמים מתמידים - זרמים שאינם דועכים עם הזמן למרות הפיזורים (האלסטיים) מהסיבים



ציור 8

שטף AB בטבעת סגורה

בחומר. פרדיקציה זו הוכחה בניסוי כעבור שבע שנים. מקרה קל יותר לאימות בניסוי אך מעט קשה יותר לטיפול עיוני הוא המוליכות של

טבעת כזאת. מוליכות זו (ציור 7a, וראו התמונה האמתית בציור 7b) תשתנה כפונקציה של שדה אהרונוב-בוהם בצורה מחזורית ובמחזור של יחידת השטף הקוונטית. את התאוריה פיתחתי עם גפן ואזבל, והאימות בניסוי נעשה כעבור כשנה (ראו ציור 7b).

הטיפול בתנודות אהרונוב-בוהם במוליכות הוליך לתובנה חדשה של הפלוקטואציות המזוסקופיות בין דגם לדגם של המוליכות. נמצא כי הן בעלות ערך אוניברסלי מסדר גודל של יחידת המוליכות הקוונטית כל עוד המערכת קוהרנטית. לא אדון כאן בנושא אך אציין כי תופעת האוניברסליות - אי-התלות של ערכים מסוימים של החומר בפרטי המערכת והבנתה היא אחד הנושאים החשובים בפיזיקה העיונית של סוף המאה העשרים. לפנינו כאן דוגמה חדשה ובלתי צפויה של אוניברסליות כזאת במערכת ראליסטית שבה זיהומים וסיגים.

תופעה חשובה אחרת בתחום המזוסקופי היא תופעת "המצור הקולוני" (Coulomb blockade). בתופעה זו צפה בפעם הראשונה בשיישים. כאשר מנסים להוסיף אלקטרון לגרגר Giaever בשנות השישים. כאשר מנסים להוסיף אלקטרון לגרגר מוליך זעיר למדי מחיר האנרגיה האלקטרוסטטית יכול להיות גבוה כל כך עד שההליך יהיה בלתי אפשרי. כדי לגרום לו לקרות יש צורך להפעיל מתחים חשמליים מתאימים ולהביא לידי כך שהגרגר יוכל לקבל אלקטרון נוסף. כיוון שתהליך שכזה יכול להיות צוואר הבקבוק בהולכה אלקטרונית דרך הגרגר, לפנינו אפשרות ליצור מתג או אפילו טרנזיסטור זעיר בצורה זו. אכן, עיקרון זה כבר אפשר הדגמה של פעולת טרנזיסטורים מולקולריים.

ברשת, אולי בתוך חומר אחר, ולקבל תכונות חדשות ושימושיות. יש בעולם פעילות מחקרית ענפה ביותר בכיוונים אלו. לפנינו ענף חדש במדע החומרים המורכבים (composite materials), שבו זה מאות שנים ויותר האדם מצליח ליצור חומרים טובים יותר משמסק הטבע ('בטון מזוין' הוא דוגמה ותיקה לחומר כזה). כפי שאפשר לראות בביקור בכל בית חולים מודרני, הפיזיקה המודרנית כבר סיפקה לאדם מגוון מרשים של אפשרויות לדיאגנוזה ולטיפול. דוגמאות חדשות יחסית הן ההדמיה האולטרסונית, ההדמיה המבוססת על תהודה מגנטית (MRI), השימוש הנרחב בסיבים אופטיים, ושיטות הצנתור המתקדמות בשילוב עם סיבים כאלה. את גודלם של הרכיבים האחרונים אפשר להקטין בסדרי גודל, ואולי לשלוט על תנועת התקנים זעירים בכלי הדם על ידי תקשורת גלית. ייתכן כי גם בתחומים אלו יוכל הננו-מדע לתרום לרווחת המין האנושי.

ד. שאלות פתוחות

אחד המאפיינים של תחום מדעי חדש ומבטיח הוא הנהייה אחריו של חוקרים רבים הנמשכים לאפשרויות השימושיות המוצעות בו. לדעתי, רצוי לצנן מעט התלהבות זו. בענף צעיר כזה יש צורך במחקר מדעי בסיסי לאו דווקא כבול בהבטחות לשימושים. בדרך כלל מחקר כזה מוליך בסופו של דבר לשימושים חשובים מאוד אך שונים מאלה שנחזו תחילה. דוגמאות לתהליך כזה הן שתי ההמצאות החשובות ביותר אולי של המאה העשרים: הטרנזיסטור והלייזר. לכן אם נתרכז בשאלות הבסיסיות שעדיין אין להן תשובות טובות במדע של מערכות ננומטריות, הרי שמלבד השאלות הטכניות (כגון איך לחבר למולקולה מגעים חשמליים טובים) מיד עולות השאלות האלה:

1. בתמונה הנוכחית שמשמשים בה - בדרך כלל החלקיקים הרלוונטיים (אלקטרונים) אינם משתפעלים זה עם זה (אין ביניהם אינטראקציות). בנוכחות האינטראקציות לפנינו בעיית הגופים המרובים, שכידוע היא קשה ביותר, ויש כנראה צורך ברעיונות חדשים כדי להתקדם כראוי.

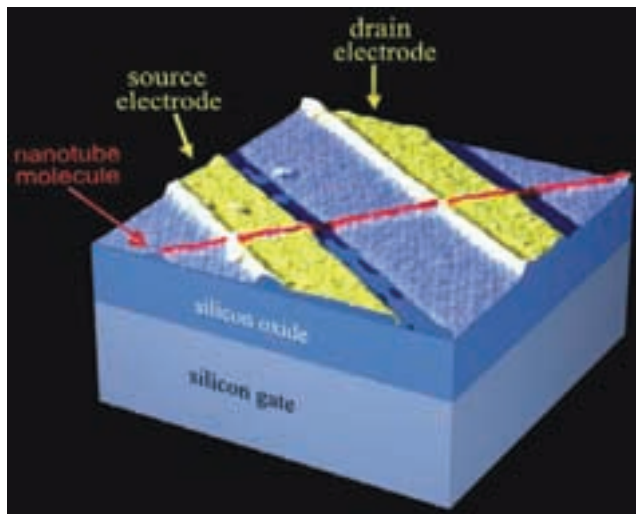
2. האם אפשר לבנות מערכת מסובכת למדי שתדע לשחזר את עצמה? היכן בדיוק עובד הגבול בין מערכת כזאת למערכת "חיה"? האם נדע לחקות במעבדה עקרונות ותהליכים שבהם משתמשים במערכות ביולוגיות?

שלוש סוגיות חשובות עולות מן השאלה הראשונה:

א. היינו רוצים לשלוט טוב יותר בתהליכי איבוד הקוהרנטיות של מערכות מסובכות, ובייחוד למצוא דרכים לשמר את הקוהרנטיות לזמנים ארוכים יותר, וזאת כדי לאפשר לתורת הקוונטים להיות רלוונטית עוד יותר. תובנה כזאת הייתה יכולה לעזור מאוד לנושאים כגון חישוביות קוונטית.

ב. דרושה הבנה טובה יותר של התחום המפריד בין מערכות מבודדות למערכות מוליכות ועולה השאלה כיצד ניתן להשרות מוליכות במערכות קטנות.

ג. כתוצאה מהאינטראקציות יכולים להיווצר מצבי צבירה חדשים של החומר, כגון מגנטיות ועל-מוליכות. מה קורה לתופעות האלה במערכות ננומטריות? האפשר לקבל כאן על-מוליכות אפקטיבית בטמפרטורות גבוהות יותר משאפשר לקבל בתחום המקרוסקופי?



ציור 10 טרנזיסטור חד-ממדי המבוסס על ננוצינורית מעל Si מאולח המשמש שער (דקר ושותפיו, דלפט)

שהמציאו Binnig ו-Rohrer בשנות ה-80, וכן ב-Atomic Force Microscope המאפשר עבודה גם עם מצעים מבודדים. את האפשרות הראשונה (ציור 3) כבר הדגים Eigler ושותפיו - היכולת להרים או להניח אטומים בודדים באתרים רצויים על פני משטח מתכתי (ציור 4) וכך לבנות מבנים אטומיים מולקולריים חדשים מעשה ידי אדם שאינם קיימים בטבע. המבנה של ציור 4 נוצר כדי להדגים במעבדה תופעות התאבכות קוונטית בסיסיות של אלקטרונים. אותם החוקרים כבר הצליחו לגרום לאטומים הספוחים גם לנוע בצורה מבוקרת על פני המשטח, וכך הדגו פעולת אלמנטים פשוטים של מחשב. פעולה זו נעשת על ידי תנועת אטומים. אחד האתגרים הוא להתקשר על ידי חיבורים חשמליים להתקנים יצירי אדם קטנים כל כך ולשלוט בזרימת האלקטרונים שעל פניהם. כמובן, זרימה זו מהירה הרבה יותר מזרימת האטומים.

השינויים במבנה האלקטרוני גורמים גם לתכונותיהן האופטיות של יחידות ננומטריות להיות תלויות תלות חזקה בגודלן ובהרכבן הכימי המדויק. אפשר לחשוב על מגוון של שימושים אופטיים ואופטו-אלקטרוניים המבוססים על אפשרויות אלו. בקרבה למשטחים מתכתיים אפשר לקבל הגברה גדולה של פליטת האור מהמולקולות. מתופעות כאלה ומתלותן במתח המופעל עולים רעיונות לשימושים מעניינים.

כמה מלים על ננו-חומרים ועל ספקולציות בתחום הרפואה: רבים מאתנו מכירים חמרים בעלי חוזק וגמישות ראויים לציון המבוססים על סיבי פחמן. סיבים אלו, קרובי משפחה של הננו-צינוריות, נמצאים בתוך חומר אחר. התכונות של המערכת המורכבת הבנויה משני חומרים או יותר ניתנות לשליטה ואפשר להגיע לתכונות טובות יותר מתכונות כל אחד מהם לחוד. אפשר ואפילו סביר לתכנן חומרים המבוססים על מערכים של יחידות ננומטריות המשובצות