

מדידות זעירות, מהפכה גדולה

ד"ר בינה קליסקי

הננוטכנולוגיה מבטיחה אינספור חומרים והתקנים חדשים, אך מציבה אתגר גדול: אם חוקרים לא יפתחו כלי מדידה חדשים להבנת תכונות החומרים הזעירים, לא תהיה אפשרות לשלוט בהם. במאמץ לגשר על הפער, ד"ר בינה קליסקי בונה את המיקרוסקופ המגנטי הרגיש בעולם

בין תכונות לבנה אחת לאחרת אינו משמעותי, ולכן חקר תכונות הל"בנים יסתיים לאחר מדידות ספורות, לא כך כשמדובר בננו-חלקיקים: כיוון שבכל חלקיק חומר ישנו מספר אטומים מצומצם, מיקומו של כל אטום משפיע באופן משמעותי על תכונות החומר, והשונויות בין תכונות החלקיקים גבוהה מאוד. בנוסף, לא תמיד קיימים מכשירים רגישים דיים שיכולים למדוד "לבנה ננומטרית" בודדת. לכן נוצר בשנים האחרונות פיגור משמעותי בין היכולת לפתח חומרים והתקנים בתחום הננו לבין היכולת למדוד את תכונותיהם.

דוגמה בולטת לתכונה שבמחקר שלה קיים פער בין יכולת הפי"תוח הטכנולוגי לבין יכולת המדידה היא המגנטיות. רבים מהיישומים הננוטכנולוגיים החדשניים מבוססים על התכונות המגנטיות של החומרים הזעירים המרכיבים אותם, ולכן ישנה חשיבות רבה ליכולת לבצע מדידות מגנטיות מדויקות של חומרים בקנה מידה כה קטן.

המיקרוסקופים המגנטיים הרגישים ביותר המשמשים כיום למח"קר יכולים לאתר ננו-חלקיקים מגנטיים רק אם הם מופיעים בקבוצה של טריליון (אלף מיליארד) ננו-חלקיקים. מיקרוסקופים אלה אינם יכולים לשמש לחקר תכונות חומרים זעירים, שכן מכשירים אלה מח"שבים רק את ממוצע התכונות של אותם מיליוני ומיליארדי אטומים. הממוצע הזה יכול למסך את ההתנהגות הפיזיקלית של החומר, שכן במדידת מיליונים או מיליארדים של חלקיקים ביחד אובד מידע רב: התכונות הפיזיקליות משתנות באופן משמעותי בין חלקיק לחלקיק - בגלל שונות של הנפח, הצורה, המבנה או ההרכב הכימי. לכן חשוב

מן הידועות היא כי לא כל הנוצץ זהב, אך כשמדענים בחנו לראשונה מולקולות זהב בודדות הם גילו גם שלא כל הזהב נר"ץ: מתברר שכאשר מסתכלים על החומר במיקרוסקופ, צבעו משתנה לאדום או לסגול, ותכונות רבות אחרות שלו משתנות אף הן. חקר ומניפולציה של חומרים בקנה מידה ננומטרי - מיליארדית המטר - הולך ומתרחב בשנים האחרונות, והוא נסמך על התופעה המופלאה הזו, בה תכונות בסיסיות של חומרים משתנות כאשר אלה ממוזערים לננומטרים בודדים. זהו תחום הננוטכנולוגיה, כיום מנסים מדענים בתחום הזה לפתח שלל פיתוחים חדשניים - כמו חומרים בעלי מוליכות גבוהה ביותר, מגנטים זעירים או מתכות קשיחות וקלות כאחת - שמסתמכים על היכולת לשלוט בתכונות החומר על ידי מניפולציות בקנה מידה של מולקולות ואטומים בודדים.

העולם הננומטרי טומן בחובו הבטחה אדירה לפיתוח אינסיפור סוגים חדשים של חומרים והתקנים לשיפור חיינו, אך תחום הננוטכנולוגיה ניצב כיום בפני אתגר משמעותי. כפי שמהנדס המעור"נין לבנות גשר חייב להכיר היטב את תכונות החומרים שבהם הוא רוצה להשתמש, כך גם מפתחי יישומים ננוטכנולוגיים נדרשים להיכיר מקרוב את החומרים בסקאלת הננומטר שבה הם רוצים לעבוד. אך בעוד שקל למדי לחקור את התכונות של קורות מתכת או לבנים לבניית בניין, הרי שהמשימה הופכת למורכבת יותר ככל שמדובר בחומרים זעירים, אם, למשל, אנו רוצים לחקור את תכונותיהן של ל"בנים מסוג מסוים, קיימים כלי מדידה זמינים למשימה. כמו כן, ההבדל

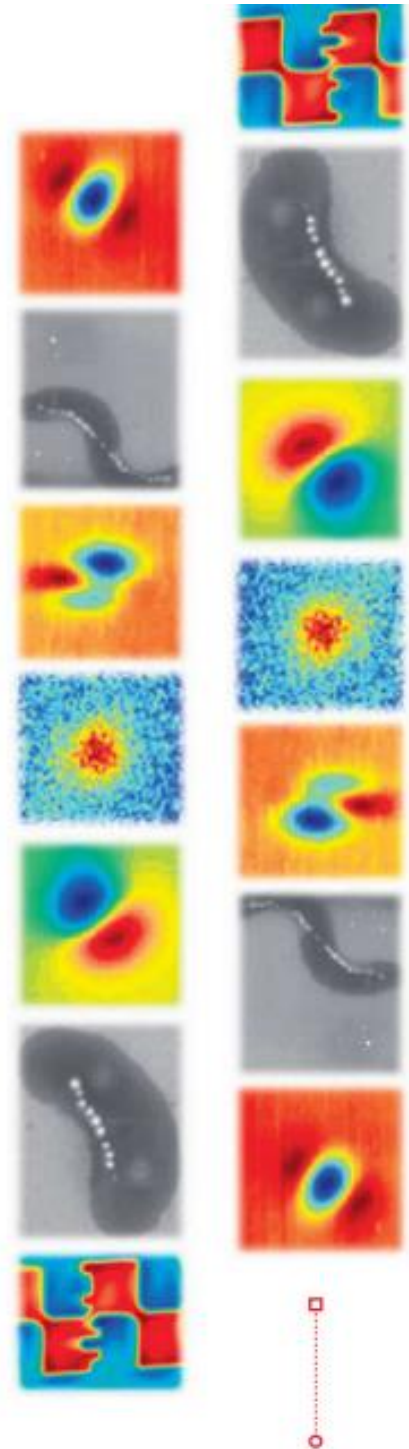
לחפש טכנולוגיה שרגישה דיה כדי לבצע מדידות על חלקיק בודד. כאן נכנסת העבודה שלי לתמונה. אני בונה במעבדה שלי באוניברסיטת בריאילן מיקרוסקופ שמסוגל לבצע את המדידות הרגישות ביותר לתכונות המגנטיות של חומרים. המכשיר הזה ידוע כ-scanning Superconducting Quantum Interference Device Microscopy, או בקיצור - מיקרוסקופ SQUID-סורק. מיקרוסקופ ה-SQUID שאני בונה יכול למדוד עשרות בודדות של אלקטרונים. השיפור ברזולוציה המגנטית שלו לעומת המיקרוסקופים המגנטיים הרגילים ביותר הקיימים בשוק הוא שיפור של כמעט עשרה סדרי גודל, וכיום זהו המיקרוסקופ הרגיש ביותר בעולם למדידות מגנטיות.

לסדר ספין

אז מהי בעצם תכונת המגנטיות? לאלקטרונים יש שתי תכונות ידועות: מטען חשמלי, המאפשר יצירת זרם חשמלי, וספין (סיבוב). באופן פשוט אפשר לומר שהמקור לתכונת הספין הוא סיבוב של האלקטרון סביב צירו. שדה מגנטי הוא סכום כל הספינים שה"סיבוב" שלהם מצביע לאותו כיוון. חומרים מגנטיים מייצרים סביבם שדה מגנטי, שכן האלקטרונים שלהם מפנים את הספין שלהם לאותו כיוון. כך מצטבר מקור כוח מגנטי, או "מומנט" גדול מספיק שנוכל להרגיש אותו וגם להדביק אותו למקרה ברוב החומרים הספין של האלקטרון נים מצביע לכיוונים אקראיים, ולכן הם אינם מגנטיים.

המיקרוסקופ שאנו בונים מורכב מטבעת זעירה של מוליך על מוליך על הוא חומר עם שתי תכונות מרכזיות: זרם חשמלי חולף בו ללא כל התנגדות, והוא אינו נוטן לשטף מגנטי לעבור דרכו. ניתן להשתמש בתכונה השנייה ליצירת ריחוף: ביפן הציבו על מסילות מגנטיות רכבות עם פס מוליך על כדי ליצור נסיעה עם חיכוך מינימלי ומהירות מירבית.

מיקרוסקופ ה-SQUID מנצל את שתי התכונות האלה של מוליך על, המתח הנוצר על הטבעת מוליכת העל של המיקרוסקופ רגיש מאוד לשינויים בשטף השדה המגנטי העובר דרכו. אפשר להשתמש בהתנהגות פיזיקלית זו כדי לעקוב אחרי שינויים בשדה המגנטי העובר דרך הטבעת, כאשר מסייעים טבעת כזו מעל אובייקט שאנו מעוניינים למדוד, אפשר למפות בדיוק רב את הטופוגרפיה המגנטית של הדגם, למשל, אם על משטח מונח ננו-חלקיק מגנטי בודד, אפשר למפות את השדה סביבו ולמצוא מה סך הספינים הכלולים בו. ככל שהטבעת קטנה יותר ונמצאת קרוב יותר לחלקיק, כך אפשר לתפוס איתה קווי שדה מגנטי רבים יותר (דמיינו קווים העוברים מהצפון לדרום של המגנט, כמו שהם עוברים סביב כדור הארץ). כיוון שהטבעת מוסעת מעל הדגם הנחקר, אפשר להבחין באופן מדויק בהתפשטות



מיפוי השדה המגנטי של חיידק מגנטי. חיידקים מגנטיים הם קבוצה של חיידקים שבאופן טבעי מגדלים בתוכם שרשרת של ננו-חלקיקים מגנטיים. בגלל השרשרת, הגוף המוארך של כל חיידק מתיישר בכיוון השדה המגנטי של כדור הארץ, כמו מחט של מצפן. בעזרת המיקרוסקופ הסורק ניתן למדוד כל חיידק בנפרד

קרקעיים. לשם כך יש מדענים שממפים את תכונות הקרקע בעומק של כמה מטרים על ידי הנחת סלילים חשמליים על פני הקרקע והזרמת זרם בהם ליצירת שדות מגנטיים. מדידת הדרך שבה הסיינים "מתאוששים" משדה מגנטי חיצוני נקראת "מדידת תהודה מגנטית גרעינית" (Nuclear Magnetic Resonance, או NMR), והיא מאפשרת להעריך את כמות המים ואת מיקומם בעומק הקרקע. הבעיה היא שהסיגנל הנמדד פשוט לא מסתדר עם מה שהתיאוריה צפתה, והדבר מעלה קושיות לגבי שיטת המדידה ומוביל למסקנה שאולי היא בכלל אינה מעשית. בניסיון להבין את הסיגנל, אחת ההשערות היא שישנם שינויים מגנטיים המופיעים בקרקע בסקאלה קטנה, והם האחראים לתופעה. אנו ממפים את הסיגנל המגנטי של

ישנן מספר קבוצות בעולם המפתחות את טכנולוגיית ה-SQUID הסורק למדידות מגנטיות רגישות וזעירות, שתיים מהן בישראל. בתחום זה אנחנו מעצמה

דגימות חול שנלכחו מקידוח בעומק 23 מטרים באתר ניסויים במא"גר מים גדול ליד נברסקה והובאו למעבדתנו. נכון לעכשיו גילינו שאכן ישנם שינויים מגנטיים זעירים בסקאלה קטנה. התוצאות שסיפק המיקרוסקופ מסבירות את הסיגנל הנלווה שמופיע במדידות NMR בסקאלה של מאה מטרים.

כיוון שמיקרוסקופ SQUID יכול למדוד שדה מגנטי ברזולוציה גבוהה, ניתן להשתמש בו גם בתחום הביולוגיה. היתרון המרכזי שלו הוא שמדידה מגנטית אינה נוגעת בדגם, ולכן אינה "מכתימה" או "מזהמת" אותו ואינה מתערבת בפעולתו. שני מחקרים שבהם אני עוסקת הם מדידת זרם של תא עצב בודד ובחינת חיידקים מגנטיים. חיידקים מגנטיים נמצאים בנחלים ברחבי העולם, וכחלק ממנגון היווט שלהם הם נעזרים בשדה המגנטי של כדור הארץ. כל חיידק, שהוא תא בודד בגודל של כחצי מיקרון, מכיל ננוחלקיקים מגנטיים המסודרים בשורה. הננוחלקיקים מיישרים את החיידק עם כיוון השדה המגנטי של כדור הארץ בדומה למצפן. חוקרים מסטנפורד גילו שחיידקים אלה משפרים באופן ניכר את הסיגנל של סורק MRI כשמזריקים אותם למחזור הדם במהלך בדיקה.

בניסיון להבין את המנגון שמאחורי התופעה הזאת, השתמשתי ברגישות של מיקרוסקופ ה-SQUID ומדדתי חיידקים בודדים. גיליתי

קווי השדה ממנו, עד לדעיכתם.

ישנן מספר קבוצות בעולם המפתחות את טכנולוגיית ה-SQUID הסורק למדידות מגנטיות רגישות וזעירות, שתיים מהן בישראל. בתחום זה אנחנו מעצמה.

המכשירים שאנו מפתחים משמשים למחקר מרתק של תופעות פיזיקליות המתרחשות בסקאלה זעירה. בשל מיעוט המדענים המומחים במדידות מגנטיות רגישות מאוד, אני מקבלת פניות רבות ממעבדות ברחבי העולם המבקשות למדוד את הדגמים שלהן במיקרוסקופ ה-SQUID הסורק. אנו יכולים, למשל, לגלות אם החומר שממנו עשוי דגם נתון מכיל מגנטיים זעירים באמצעות מעקב אחר תגובת הדגם לשינויים קטנים בשדה החיצוני המופעל עליו.

אחת השאלות הבסיסיות במדע החומרים היא כיצד שינויים זעירים בקנה מידה אטומי גורמים לשינויים דרמטיים בתכונות הפיזיקליות של החומר. למשל, מדוע חומרים מסוימים משנים את התנגדותם לזרם העובר בהם, או מפתחים תכונות מגנטיות, או משנים את גודלם בנוכחות שדה חשמלי. הרגישות הגבוהה של המיקרוסקופ והעובדה שבמציאות החומרים אינם הומוגניים כפי שהיינו רוצים לחשוב, מאפשרות לנו למפות שינויים לוקאליים בתכונות פיזיקליות שונות כגון מגנטיות והולכה חשמלית, מיפוי כזה יאפשר לנו להבין מדוע עיוות מסוים בדגם גורם לתכונה מסוימת ולא אחרת.

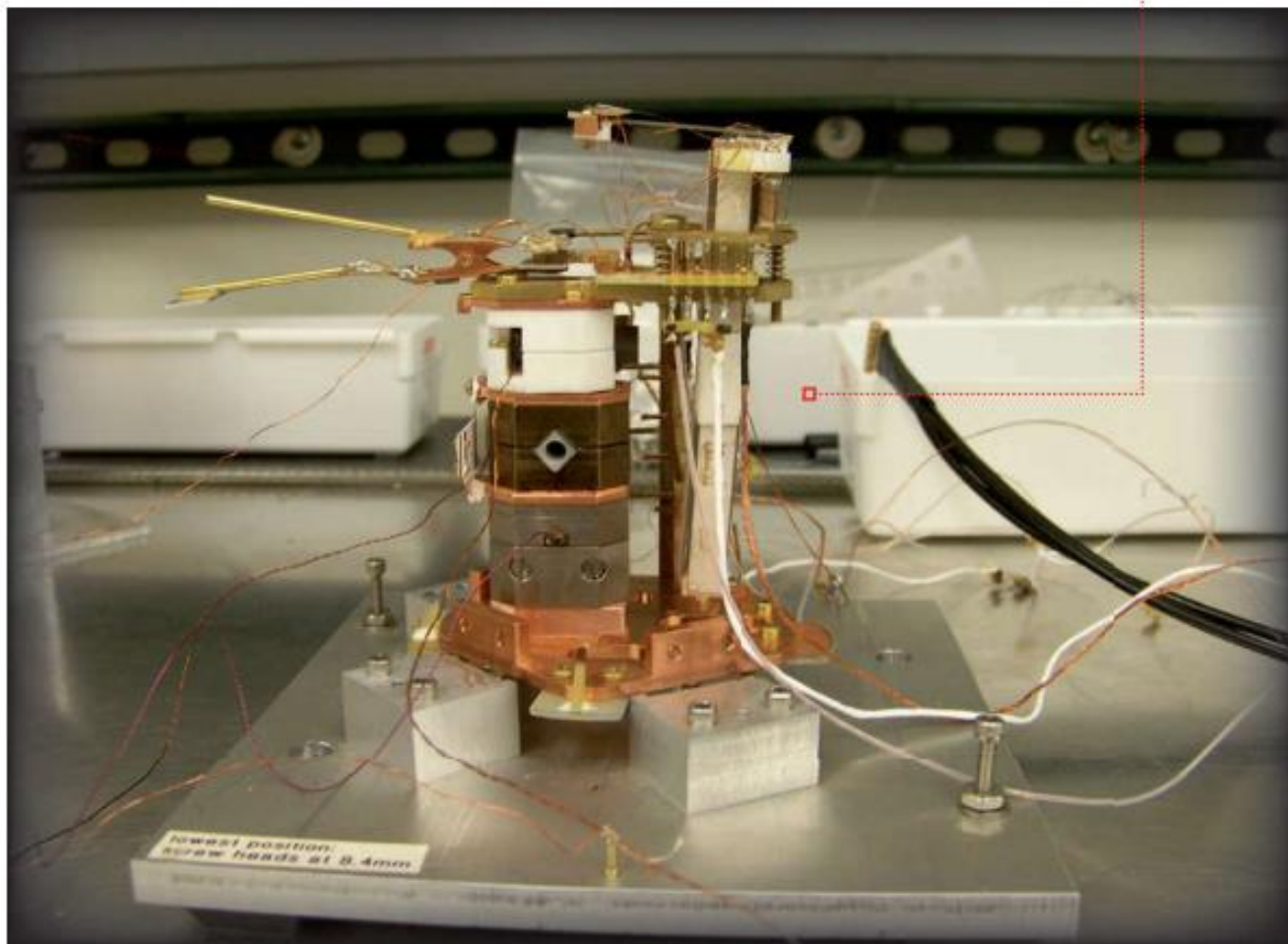
איים מגנטיים בזרם

אחת התגליות החשובות שלי באמצעות המיקרוסקופ נוגעת לתופעה שמרתקת מדענים רבים בתחום מדע החומרים. מדובר בק"ס שמתרחש כאשר מגדלים חומר אחד על חומר אחר כמו ממרח על פרוסה. כאשר לוקחים שני חומרים, שכל אחד מהם בפני עצמו מבודד ולא מגנטי, אבל מניחים אותם זה על גבי זה בלפחות ארבע שכבות של אטומים בודדים, הממשק ביניהם נהפך פתאום למוליך, למוליך על ואפילו למגנטי. כל זה מפתיע מאוד. הופעת תכונות בממשק שכזה והיכולת לשלוט על הופעתן חשובות ומעניינות טכנולוגית ומחקרית, במיוחד כיוון שההולכה היא דו־ממדית.

חקר המבנה הזה הצריך מדידות רגישות, והמיקרוסקופ שלנו נרתם למשימה. כך גילינו שבמבנה מופיעים איים מגנטיים קטנטנים, בדומה ליזכרונות מגנטיים. אנחנו עדיין לא מבינים מדוע האיים המגנטיים הזעירים האלה מופיעים פתאום ואיך הופעתם יכולה להינתן שיתוב עם התנהגויות אחרות בחומר, אך אנו רואים שהם שם. בנוסף גילינו שההולכה בממשק אינה הולכה דו־ממדית אחידה ופשוטה, אלא קיימת בממשק רשת של ערוצים דקים שבהם זורם הזרם.

דוגמה נוספת לחידה שאנחנו מנסים לפתור בעזרת המיקרוסקופ היא בעיה שמטרידה גיאולוגים שעוסקים בחיפוש מאגרי מים תת-

חלק ממיקרוסקופ ה־SQUID הסורק, ה־SQUID הוא חיישן שמסוגל למדוד שטף מגנטי ברגישות גבוהה. רגישותו גדולה פי טריליון מהמגנטומטרים המסחריים הקיימים היום, והוא מסוגל למדוד שדה מגנטי החלש אפילו פי מיליון מהשדה המגנטי של כדור הארץ



המיקרוסקופים המגנטיים הרגישים ביותר המשמשים כיום למחקר יכולים לאתר קבוצות של טריליון ננוחלקיקים. מיקרוסקופ ה־SQUID שאני בונה יכול למדוד עשרות בודדות של אלקטרונים

שהשונות המגנטית בין כל חיידק לחברו גדולה בהרבה מהמצופה, והשוויתי בין חיידקים שגודלו בתנאי סביבה שונים ולכן פיתחו רמות שונות של מגנטיות. אנו מנסים לתרום לשיפור הרזולוציה של מדידות רפואיות כמו MRI, עד לרמה של ביצוע MRI על תאים בודדים. כיוון שהמיקרוסקופ פועל כיום רק בטמפרטורות נמוכות בהרבה מטמפרטורת החדר, הוא מחייב את הקפאת הדגמים הביולוגיים, ולכן לא ניתן לעקוב בעזרתו אחרי הדינמיקה של מערכות חיות. אני מחכה בקוצר רוח ליום שבו אוכל לבנות מיקרוסקופ בטמפרטורת החדר למדידת דגימות ביולוגיות, אך זה עדיין חלום רחוק. בעשור הקרוב בכוונתי לפתח ולשכלל את ה־SQUID הסורק ולשלב בו טכנולוגיות חדשניות, כדי שאפשר יהיה לפתור בעזרתו בעיות רבות נוספות בתחום הננו. X