

טוב, שלום לכולם שמי נורית אברהם, אני עמיתת מחקר בקבוצה של חיים ביידנקופף, במעבדה לפיזיקה של סקאלות אטומיות, במחלקה לפיזיקה. בשעה הקרובה אני רוצה לחשוף אתכם לכלי נסיוני פנטסטי ומעורר התפעלות, הן ביכולות המדהימות שלו והן בדרך שהוא השפיע על המון תחומי מחקר כמו פיזיקה, מדעי החומרים, מדעי פני השטח, בעצם הוא סימן את העידן של תחילת הננו טכנולוגיה. ומה שאני רוצה להראות לכם זה איך אנו משתמשים בכלי הזה כדי לחקור סוג חדש של חומרים. שנקרא חומרים טופולוגיים, שהתגלה ב-10 השנים האחרונות והחומרים האלה בעצמם מציגים פיזיקה מעניינת, מפתיעה, לא אינטואיטיבית שמעוררת התפעלות במידה דומה לכלי הניסיוני שאיתו אנו מודדים. הכלי שאני מדברת עליו הוא scanning tunneling microscope (STM) – בעברית זה מיקרוסקופ מינהור סורק, והכלי הזה מאפשר לנו לראות אטומים במעבדה. אתם יודעים, אנו חיים עם הקונספט של אטומים כמעט 3000 שנה, היוונים טבעו לראשונה את המושג הזה במאה ה-5 לפני הספירה, ולפני שלושים וחמש שנה הומצא המכשיר שמאפשר לנו לראות אטומים. ולא רק לראות אלא להזיז, לסדר אותם במבנים, אטום אחר אטום כמו לגו של אטומים. יותר מזה, נראה שהמכשיר הזה מאפשר לנו לראות פונקציות גל של אלקטרונים. אספר על המכשיר הזה. הדבר הנוסף שמרתק בכל הסיפור הזה זה שהקלף שמשחק פה תפקיד מרכזי, הדבר העיקרי שמאפשר את הפעולה של המיקרוסקופ הזה זה תורת הקוונטים – העקרון המרכזי הוא של תורת הקוונטים. אספר על המכשיר הזה, איך הוא עובד, מה נותן לו את הרזולוציה הגבוהה שאף מיקרוסקופ אחר לא מגיע אליה, אתרכז באחת משיטות המדידה שאנו מתרכזים בה התאבכות של קוואזי חלקיקים, אספר על החומרים הטופולוגיים ואדגים תוצאות שקבלנו מפרויקטים שאנו עובדים עליהם.

אז כמו שאמרת, נראה איך רואים אטומים, איך מזיזים אותם, אספר על השיטה ואדבר על חומרים טופולוגיים. זה המיקרוסקופ, ככה נראה מיקרוסקופ מנהור אלקטרוני, הוא די גדול, החדר הזה הוא 3 על 3 מטר, ולמערכת יש נוכחות בחדר, אבל עיקר העניין מתרכז בחלק הזה שהוא ראש המיקרוסקופ, בגודל של בערך 4-5 ס"מ, ולב לבו מתרחש באזור הזה שפה. יש לנו מחט מאד מאד קטנה, כמה מילימטרים, מחודדת בצורה פנטסטית כך שיש לנו ממש אטום בודד בקצה, ואנו מקרבים את המחט הזו לפני השטח של החומר ובעזרת איזשהו זרם שיש לנו בין המחט לפני השטח, אנו יכולים לקבל את תמונת פני השטח של החומר ברזולוציה אטומית. אנו יכולים לשאול את עצמנו בכל זאת למה המערכת הזאת כ"כ גדולה? אם כל העניין קורה בחלק נורא קטן. אז תבינו, שהמדידות הן מדידות מאד מאד רגישות, ובשביל שהמכשיר הזה באמת יוכל לתת את התוצאות, יש כמה אתגרים שצריכים לעמוד בהם. לדוגמה: פני השטח, החומרים שאנו מודדים צריכים להיות מאד מאד נקיים. כל גרגר אבק, כל סוג אחר של אטומים, חמצון, ספיחה של מולקולות מים – תמנע מאיתנו את האפשרות לראות את פני השטח. מה שאתם רואים פה זה משאבות ומיכלים מפלדת אל-חלד שאנו שובים אותם לוואקום מאד גבוה ויוצרים סביבה מאד נקייה, וברגע שהחומר נמצא בתוך המיכלים האלה אז אנו חושפים פני שטח ועד הרגע שהחומר מגיע לפריקה במיקרוסקופ הוא נשאר בסביבה מאד מאד נקייה. דבר נוסף, הצורך שלנו להביא את המערכות שלנו לטמפרטורות נמוכות, כי חלק מהתופעות שאנו מתעניינים בהן קורות בטמפרטורות נמוכות וגם מהסיבה שאנו רוצים להיפטר מרעשים שנובעים מהעובדה, רעשים תרמיים מהעובדה שמודדים בטמפ' גבוהה.

בואו ננסה להבין את עיקרון הפעולה של המיקרוסקופ. אז יש מחט מאד מאד דקה, עם אטום בודד בקצה, ואנו מקרבים אותה לפני השטח של החומר, אבל אנו משאירים איזשהו רווח. וכמה קרוב? תיכף נגיד מה זה קרוב. ואנו משרים איזשהו מתח, בין הטיפ לבין הדוגמה. ברגע שמשאירים את המתח, אז אלקטרונים רוצים לעבור מהטיפ אל הדוגמה, או לפי כיוון המתח, מהדוגמה אל הטיפ. אבל המעגל אינו סגור. יש לנו איזה רווח קטן של ואקום, וכמו שאנו יודעים, ואקום הוא מבודד אינסופי, אז האלקטרונים שלנו צריכים להתגבר על מחסום פוטנציאל שיותר גדול מהאנרגיה שלהם, והתורה הקלאסית אומרת

שזה מה שיקרה להם, הם ינסו וינסו ולא יצליחו לעבור, והזרם שיתקבל יהיה אפס. לעומת זאת, התורה הקוונטית אומרת לנו שהאופי הגלי של החלקיקים שלנו ידאג שיש איזשהו סיכוי שכמה חלקים יעברו את המחסום. אז אמנם כמה מהחלקיקים יתנהגו בצורה הזאת אבל מדי פעם חלקיק יצליח לעבור וזה יגרום לזרם מנהור, וזו תופעה של תורת הקוונטים. יהיה זרם מנהור בין הטיפ לבין הדוגמה, והזרם הזה הוא כ"כ רגיש, הוא תלוי בצורה מאד מאד חזקה ברווח הזה שיש לנו כאן בין הטיפ לבין הדוגמה.

אז כשאני אומרת מאד מאד חזקה, מתכוונת לתלות אקספוננציאלית, הזרם תלוי במרחק הזה, ובעוד פרמטר שלוקח בחשבון את המתכות של הטיפ ושל הדוגמה שאנו מודדים ואת האיכות של פני השטח, אבל כשאני אומרת "קרוב מאד" אנו מדברים על אנגסטרומים בודדים, כלומר 1 חלקי 10 בחזקת 10, וכדי להמחיש יותר טוב, אנגסטרום אחד זה אחד חלקי מיליון קוטר של שערה. והרגישות המופלאה של הזרם הזו היא כזאת שאם אנו מרחיקים את המחט אנגסטרום אחד מפני השטח אנו מקטינים את זרם המנהור פי עשרה. תלות אקספוננציאלית אומרת שאם נרחיק בשני אנגסטרומים נקטין פי מאה, ושלושה אנגסטרומים – נקטין פי אלף. כלומר יש פה איזשהו פרוב מאד מאד רגיש שנותן לנו את הרגישות כדי לראות את מתאר פני השטח של חומרים ולראות אותם ברזולוציה אטומית.

אז ראינו שיש לנו רזולוציה מאד מאד גבוהה בכיוון של הדוגמה אבל בדיוק מאותה סיבה אנו מקבלים רזולוציה מרחבית פנטסטית. כי שימו לב: כל זרם המנהור קורה מאטום אחד בקצה שנמצא בקצה הטיפ, כי האטום הבא מרוחק אנגסטרום אחד יותר רחוק מפני השטח וזרם המנהור יהיה קטן פי עשרה. כלומר יש לנו טיפ מאד מאד דק שמטייל על פני הדוגמה ומאפשר לנו הרזולוציה האטומית. אוקיי, אז בוא נבין עכשיו איך אנחנו בעצם רואים את האטומים. שיטת המדידה היא שיטת מדידת טופוגרפיה, מה שאנו עושים, אנו מקרבים את הטיפ, מאד מאד קרוב, עד שמקבלים זרם מנהור ואז אנו מניעים את הטיפ שלנו על פני השטח של הדוגמה, כמו קרן אלקטרונים של טלוויזיה, הלך וחזור, ואנו תוך כדי כך מבקשים, דורשים, שזרם המנהור יישאר קבוע, ובשביל כך המחט צריכה לעקוב אחר פני השטח של הדוגמה שלנו ובצורה הזאת אנו מקבלים את המפה הטופוגרפית עם רזולוציה אטומית. בואו נראה כמה דוגמאות של אטומים. אלה חומרים שמדדנו, שאנו מודדים במעבדה בחודשים האחרונים. כאן יש לנו חומר שנקרא וויל סמי מטאל, הוא חומר טופולוגי, אספר עליו בהמשך. מה שרואים כאן: רואים אטומים במעבדה! הדבר הזה מדהים, כי אתם יודעים, עד לפני גילוי המכשיר הזה, אטומים היו משהו נורא מרוחק, נורא קטן, שאי אפשר להגיע אליו, ופתאום יש לנו כלי שמאפשר לנו לראות אטומים על מסך המחשב שלנו, ולא רק לראות אטומים אלא גם להזיזם ותכף נראה איך עושים זאת. אז כאן יש אטום של חומר אחר שנקרא מוליך טופולוגי חלש, והנה אטומים של סיליקון ויש מבנים שנוצרים על פני שטח החומרים רק מסיבה שחשפנו את פני השטח או שברנו את הסימטריה של החומר עצמו.

אוקיי. ראינו אטומים, כאן יש לנו אטומים של זהב, זה פני השטח של זהב כשלוקחים אותו ברזולוציה קצת יותר קטנה ולא רואים רזולוציה אטומית אבל ממש רואים את פני השטח, כאן יש מדרגות אטומיות ורואים reconstruction מבנה שנקרא הריבון שאופייני לפני שטח זהב, וברזולוציה יותר טובה רואים את האטומים של הזהב. שימו לב מה רואים כאן, איזשהו גל שנראה ממה כמו גל שאנו מקבלים כשאנו זורקים אבן לתוך מים, כמו אדוות, שאדוות שקורית סביב אותה נקודה שהאבן מגיעה למים, ואנחנו נחזור לגלים האלה כי הם יהיו מרכז השיטה שאנו מתעסקים בה, וכמו שאנו רואים פה, זה בעצם גל של אלקטרון. גל של אלקטרונים שנמצאים על פני השטח של הדוגמה. אוקיי, וכאן, מה שאנו רואים... אוקיי, בסדר, זאת תמונה של פרס נובל, היא התמונה ההיסטורית הראשונה של סריקה של פני שטח של זהב. המכשיר התגלה, פותח בשנת 1981 ע"י שני מדענים בשם גרד ביניג והיינריך רורר במעבדות IBM בציריך, וכמו שאתם רואים לא לקח הרבה זמן להבין איזו פריצת דרך זו, כמה גדולה תהיה השפעה של מכשיר זה בכל מיני תחומים ובאמת ב-1986 קיבלו פרס נובל. הרעיון של מדידת פני שטח בעזרת זרם מנהור זה משהו שעלה עוד לפני, בשנת 1971, וגם פותח מכשיר, אבל לא הצליחו להביא את המחט

ממש קרוב לפני השטח והרזולוציה שלו לא הייתה מספיקה לקבל רזולוציה אטומית, וכמה שנים אח"כ המכשיר פותח ע"י שני המדענים.

אוקיי, ראינו איך אנו רואים אטומים. בואו נראה איך אנו מזיזים אטומים ומסדרים אותם במבנים אחד ליד השני. אז את הטכניקה הזאת אנו לא עושים במעבדה, נכון להיום, אנו צעירים... בעתיד גם אנו נפתח את "מפעל הלגו"... אבל הדרך לעשות, אז אראה לכם פה תמונות ממעבדות IBM אבל הדרך לעשות זאת היא כזאת: אנו לוקחים אטומים של איזושהי מתכת ומפזרים אותם או מנדפים אותם על מתכת אחרת, ודבר ראשון אנו סורקים את פני השטח ובודקים ורואים איפה האטומים הזרים. ואז מקרבים את הטיפ קרוב מאד לאחד האטומים ומתחילים ככה לנוע מעליו עד שנוצר איזושהו קשר כימי. יודעים הרי שאטומים אוהבים להתקשר אחד לשני, וכשהקשר הכימי נוצר אנו יכולים לגרור את האטום ולהביאו למקום שאנו רוצים על פני הדוגמה. בצורה כזאת אפשר לבנות מבנים, שימו לב, בונים פה את המעגל הזה שכולו עשוי משורה של אטומים, ואפשר אפילו לייצר סרטים קטנים, כל נקודה כאן היא פשוט אטום בודד. זה הפרומו... בהמשך העלילה מתפתחת, הוא מקפיץ כדור, חוזר...

אולי אפשר לשלוח אותו לפסטיבל קאן כסרט הקטן הטוב ביותר.

אז זה אמנם גימיק נחמד אך הוא מדגים את היכולת הפנטסטית של המכשיר הזה, ומגוון האפשרויות שהטכנולוגיה הזאת פותחת הוא אדיר! אנו יכולים לבנות מעגלים, בגודל ננומטרי, ואנו יכולים... שימו לב מה קורה כאן. כאן קורה דבר מעניין, בתוך המבנה הזה נוצר לנו גל. ושוב, זה אותו גל שראינו קודם על משטח של זהב, והגל הזה הוא פשוט גל של האלקטרונים שנמצאים על פני השטח של הדוגמה שלנו. אתם יודעים, אנו שומעים ע"י תורת הקוונטים שהאלקטרונים הם גלים, וזה נשמע לנו משהו נורא אבסטרקטי, ופה אנו רואים פשוט גל של אלקטרונים. ובאמת בגלים האלה, את הגלים האלה, את הדרך שמשתנים באנרגיה, אנו נראה איך אנו יכולים ללמוד מהם על התכונות האלקטרוניות של החומר.

אוקיי, אז ראינו איך אנו מזיזים אטומים, ראינו איך אנו רואים אטומים אבל באמת בשביל ללמוד על התכונות האלקטרוניות של החומרים האלה, אנו צריכים לקבל איזושהי אינפורמציה על המצבים, מצב האנרגיה של האלקטרונים בדוגמה, על מבנה הפסים של האלקטרונים שמגדיר לנו את התכונות האלקטרוניות. ובדיוק כמו ש... אם היינו רוצים לקבל איזושהי טביעת אצבע של אטום בודד, מה שעושים – מעוררים האלקטרונים לרמות גבוהות יותר, נותנים להם לדעוך, בזמן הדעיכה הם פולטים קרינה אלקטרומגנטית שממנה יכולים לקבל את ספקטרום פליטת האטום. מקבלים את טביעת האצבע. גם כאן אפשר לעשות ספקטרוסקופציה שנותנת לנו טביעת אצבע של החומר. ואז אין לנו רמות אנרגיה בדידות אלא הרמות האלה מתרחבות לפסי אנרגיה, עם אזורים מותרים ואזורים אסורים, ומבנה הפסים הזה מגדיר לנו את תכונות האלקטרוניות שלה חומר ואנו יכולים ממש להבין את מבנה הפסים האלה בעזרת ה-STM. מה שאנו עושים זה ע"י מדידה של גודל אחר, שהוא לא הזרם, הרי בשביל לראות את פני השטח שמרנו על זרם קבוע, ואנו מודדים את הנגזרת של הזרם לפי המתח וזה נותן לנו גודל שנקרא "צפיפות המצבים האנרגטיים של האלקטרונים". במילים אחרות, יש לנו דרך לקחת אלקטרונים ולשלוח אלקטרונים... סליחה, באנרגיות שונות, אל הטיפ שלנו, ובעצם לספור את כמות המצבים עבור כל אנרגיה. הרי מה קורה? ברגע שהאלקטרון עוזב את הטיפ שלנו יש לו איזושהי... המקום שלו מאד מאד מוגדר, ובגלל זה, עיקרון אי הוודאות של אייזנברג אומר לנו שהתנע שלו לא מוגדר, לא ידוע. עכשיו האלקטרון מגיע אל הדוגמה, הוא פשוט מחפש אנרגיה להכנס אליה, אם יש לו אנרגיה הוא יכנס לדוגמה ויהיה לנו זרם. אם אין אנרגיה, למשל במקרה של חצי מוליך, שיש אזור של אנרגיות אסורות, אם אנו שולחים אלקטרון באנרגיות האלה הוא לא יכנס לדוגמה. וזה אם אני לוקחת עקומה ומציירת את המבנה של רמות האנרגיה, אני יכולה לדעת על התכונות של החומר, אז הנה, דוגמה של מדידה כזאת שאנו עשוינו על החומר הזה שנקרא מוליך טופולוגי חלש, וכאן יש לנו... אנו מודדים בדיוק את הנגזרת כפונקציה של האנרגיה, אנו כל פעם שולחים אלקטרונים באנרגיות שונות והנה העקומה הנמדדת של צפיפות המצבים

הנמדדת של האלקטרונים בחומר לשנו. וכאן אנו רואים חישוב של אותו גודל, ורואים את פער האנרגיה, אותו מקום שאין לנו הולכה של חשמל.

אוקיי. אז יש לנו דרך אחת לספור את המצבים בכל אנרגיה, אבל יכולים לקבל יותר מזה. ממש יכולים לדעת אינפורמציה על פונקציית הגל, אותה פונקציית גל של אלקטרונים המתארת את ההסתברות למצוא אותו במיקום מסוים או בתנע מסוים במרחב.

והגלים האלה זה אותם גלים שראינו כבר קודם, אז בוא ננסה להבין איך אנו עושים את זה. אז הנה, כאן אנו רואים משטח של נחושת, ושוב, הגלים האלה הם גלים של אלקטרונים. ננסה להבין למה הגלים האלה נוצרים. עכשיו, מה שאנו עושים זה מה שאנו עושים בד"כ כשאנו רוצים למדוד מערכות פיזיקליות, אנו לוקחים איזושהי מערכת שהיא בד"כ שלווה, ואנו מכניסים איזושהי הפרעה קטנה ובודקים את תגובת המערכת להפרעה ומזה אנו למדים על התכונות של המערכת שלנו. אז במקרה הזה יש לנו, אנו צריכים לחשוב על ים האלקטרונים שנמצא לנו על פני שטח הדוגמה, והדרך להפריע לו הוא ליצור איזשהו "אי-שלמות" במבנה המחזורי של פני השטח שלנו, ליצור איזשהו דפקט, לדוגמה אטום חסר או אטום זר או איזושהי מדרגה אטומית ואז מה שקורה, האלקטרונים מגיעים אל המבנים האלה ומתנגשים וחוזרים חזרה, ואז יש לי איזושהי מבנה של התאבכות, כלומר אנו יודעים שגל שהולך וגל חוזר יכולים להתאבך, לפי האמפליטודות, ויש התאבכות בונה ויש הורסת, וזה הגלים.

שיטת המדידה נקראת quasi particle interference בתרגום לעברית החלטתי שזה יהיה "התאבכות של "עאלק" חלקיקים"... פה רואים התאבכות כזו, רואים את הזיהום שנמצא על פני השטח שהחלקיקים שלנו מגיעים אליו, חוזרים יוצרים איזשהו מבנה של התאבכות בונה ואנו רואים אותו. ושימו לב, ממש יכולים לראות את האורך, את אורך הגל של המבנה הזה, כמו שאנו רואים אותו פה על פני השטח של נחושת.

אז עכשיו, אנו יכולים, יש לנו דרך שאנו יכולים להבין איך נראים הגלים האלה. ואנו יכולים עכשיו לראות איך הם מתפתחים באנרגיה וממש לקבל את הספקטרום, את יחס הנפיצה של החומר, ששוב מכתוב לנו את התכונות האלקטרוניות של החומר. שימו לב: יכולים לקחת את המדידה הזאת, המיפוי הזה, הגלים האלה, ולבצע אותם בכל מיני אנרגיות, שוב, על ידיד שאנו שולטים במתח בין הטיפ והדוגמה, וממש לקבל איזשהו גרף שמגדיר לי... פה אנו רואים יחס נפיצה של חלקיק חופשי שגז האלקטרונים הדו מימדי שיושב לנו על פני שטח הנחושת. כלומר לכל אנרגיה רואים איזה אורך גל יהיה לנו וממש לומדים על האלקטרונים. יש לנו ממה מעבדה שממחישה לנו בצורה ויזואלית את מכניקת הקוונטים, כלומר ממש רואים הגלים האלה.

טוב, אז עכשיו, אחרי שהבנו איך אנו משתמשים בטכניקה הזאת להבין את התכונות של החומר, להבין את טביעת האצבע של החומר, אני רוצה להראות לכם כמה מערכות ומה אנו מבינים בעזרת המדידות האלה. אז כאן, יש לנו, המערכת הראשונה שהתחלנו ללמוד היא של ננו חוטים, שהדס מגדלת במרכז, החוטים האלה הם של 1 ננו מטר, גדלים לגובה על איזשהו משטח אב והמערכות האלה הן בעצם מערכות חד-מימדיות. האלקטרונים יכולים לנוע לאורך הננווייר, לאורך החוט, אבל לא יכולים לנוע ימינה ושמאלה. יש מערכת חד מימדית ויכולים ללמוד את הפיזיקה במערכות חד מימדיות. הנה אנו רואים פה מפה טופוגרפית, סריקה של הננווייר שלנו, אם נבצע סריקה ברזולוציה יותר גבוהה נראה את המבנה האטומי על פני השטח. כאן אנו רואים את אותם גלים והפעם ההפרעה שיצרנו זה בעצם הקצה של החוט. האלקטרונים זורמים, נעים על החוט, מגיעים לקצה, מתנגשים בקצה, חוזרים ויוצרים לנו את המבנים האלה. עכשיו, שימו לב, מה שקורה פה, פה אנו רואים שהגל הזה דעך. והדעיכה הזאת של הגל בעצם אומרת לי, מספרת לי כמה קוהרנטי האלקטרון שלי על פני השטח. אנו יכולים לראות את הרלקסציה של האלקטרונים האלה, של הדעיכה, ולהבין כמה הם קוהרנטיים. ההתנהגות שאנו רואים פה היא מאד מפתיעה, לא מונוטונית, לא ציפנו לראותה. שימו לב שהגלים פה מאד מאד ארוכים, דועכים

אחרי מרחק גדול. וגם באנרגיות גבוהות הם דועכים אחרי מרחק גדול, אבל פה באמצע יש לנו אנרגיות שהגלים דועכים הרבה יותר מהר. מה מיוחד באנרגיות אלה? נכון להיום יש לנו הבנה של התופעה הזאת, אני לא אכנס אליה, כי זה נושא להרצאה אחרת, אבל זה אחד הדברים המעניינים שראינו על הננו הייר הזה.

הנושא הבא שאני רוצה לדבר עליו זה חומרים טופולוגיים. מה זה החומרים הטופולוגיים? אפשר להגדירם כמערכות אלקטרוניות מורכבות שמציגות תכונות שהן לא תלויות בפרטים של המערכת. הדוגמה הטובה ביותר היא של אפקט הול הקוונטי, כלומר לוקחים משטח דו מימדי, שיש לנו גל דו מימדי של אלקטרונים, ומפעילים שדה מגנטי אנך, מזרימים זרם לכיוון אחד ומודדים המתח בכיוון האחר. הפרטים של המדידה ומה אנו מודדים פה, בין אם אתם זוכרים ובין אם לא, הם פחות חשובים. אבל מה שחשוב, זה כשאנו מודדים את ההתנגדות רואים מדרגות! רואים מדרגות מאד מאד שטוחות. והדיוק של המדרגות האלה הוא דיוק פנטסטי, דיוק של אחד חלקי 10 בתשיעית. והדיוק הזה, המדרגות האלה, לא תלויות – לא במבנה, לא בגיאומטריה של החומר, לא בחומר עצמו וגם לא בתנאי השפה. כלומר יש לנו איזושהי תכונה מאד מאד בומבסטית, יחס בין שתי המדרגות האלה יישאר קבוע, לא משנה מה נעשה לדוגמה. כלומר זו דוגמה ששורדת, לא משנה איזה תלאות נשים לה בדרכך.

דוגמה אחרת – מבודד טופולוגי, מבודד טופולוגי חזק. החומר הזה חלקו הפנימי מבודד, אבל על השפה הוא מוליך. זה כמו לקחת חתיכת פלסטיק ולעטפה במוליך. עכשיו, למצבי השפה האלה יש גם תכונות מיוחדות, הספין שלהם יש לו קורלציה עם כיוון התנועה שלהם, אבל מעבר לזה, הם טוב, הם מאד מאד רובסטיים, כלומר אם ננסה לקחת ולשייף את השכבה החיצונית המצבים האלה יירדו למטה, למחתרת וייווצרו מחדש. אם נזהם את פני השטח וננסה למקם אותם – לא, הם ימשיכו. אין לנו שום דרך להיפטר מהמצבים האלה כי הם נובעים מאיזושהי תכונה טופולוגית של מבנה הפסים של החומרים האלה.

וזה מה שעושה את השילוב הזה בין המכשיר שאיתו אנו מודדים לבין החומרים האלה, איזושהו זיווג משמיי. כי במערכות הטופולוגיות בד"כ הביטוי של התכונה הטופולוגית קורה על פני השטח בצורה של מין מצבים עם תכונות מאד מאד מפתיעות ומיוחדות. זה בתיאוריה, אבל מה שקורה בשטח זה יותר המצב הזה... אנו יודעים שנישואים, (וגם ניסויים) הם לא תמיד גן עדן. אבל מה שאני רוצה להגיד פה, שהניסויים האלה מאד מאד קשים, הם מסובכים, זה לא שאנו מכניסים דוגמה למערכת ומיד רואים אטומים וכל הגלים שאנו מתעניינים בהם ויכולים לחקור את הגדלים שאנו מחפשים, אלא אנו מכניסים דוגמה, משקיעים המון המון זמן בלחפש אזור טוב שנוכל להוציא את הפיזיקה שאנו רוצים, אבל ברגע שאנו מגיעים לאזור שמאפשר את המדידות האלה אז זה שווה את כל המאמץ.

החומר הבא שאספר לכם נקרא מבודד טופולוגי חלש, החומר הזה טוב, הוא חומר טופולוגי ומה שהוא מציג זה המבנה הבא: הוא מבודד מבפנים, אבל חלק מדפנותיו החיצוניות מבודדות והחלק האחר הוא מוליך. שוב, זה חומר קלאסי לבדוק את התכונות שלו ב-STM. אנו יכולים לבוא עם הטיפ שלנו מלמטה ולבדוק התכונות האלקטרוניות, אפשר מהצד, והחומר הזה הוא כעיקרון, בניגוד לחומרים הטופולוגיים החזקים שכבר נתגלו בצורה ניסיונית ונעשים עליהם ניסיונות, החומר הזה הוא חומר שהוא עדיין בחזקת תחזית תיאורטית. יש חומר שהתכונות שלו אמורות להיות כאלה וזה אחד הדברים שאנו רוצים לבדוק, אבל מסתבר שפני השטח הם יותר מדי משוננים ואין לנו אפשרות לבוא עם הטיפ העדין וממש למדוד את פני השטח. אז הפיתרון שמצאנו לזה, הוא הפיתרון הבא: אם אנו פשוט קורעים את החומר או מבקעים אותו, ועושים בשיטה ממש פרימיטיבית, יכולים לקחת סלוטייפ שנמצא על כל שולחן, להדביק על פני השטח ופשוט להוריד אותו, נוצרות לנו מדרגות על פני השטח, ושימו לב, המדרגות האלה הן מדרגות חד שכבתיות, החומרים האלה בד"כ חומרים שכבתיים, ומדרגה כזאת יש לה בחלק העליון את הדופן הזאת, ופה בקצה יש להם חלק מהצד הזה. אז מה שאנו אמורים לראות בקצה המדרגות

מצפים לראות איזשהו זרם חד מימדי, איזשהו מצב טופולוגי מאותם המצבים עם העמידות הגבוהה. אז בואו נראה מה ראינו על החומרים האלה. הנה מפה טופוגרפית של פני השטח, רואים את המדרגות, וכשאנו מבצעים מפה טופוגרפית של צפיפות המצבים על קצה המדרגה, אנו רואים פה איזשהו ערוץ שמראה לנו את הנכחות של זרם חד מימדי שמוגבל לקצה המדרגה, ואם אנו מודדים באזור הזה אנו נראה מצב מבודד. ומעבר לתצפית עצמה, המערכת הזאת היא מערכת מופלאה. יש לנו צ'נלים חד מימדיים בתוך רקע או סביבה מבודדת, אנו יכולים עכשיו שוב לבדוק תכונות של מערכות חד מימדיות, אנו יכולים לנדף על המדרגות האלה חומר אחר, לדוגמה להשרות אל-מוליכות ולראות את התופעות הנפלאות שאנו יכולים לקבל בחומרים האלה.

החומר האחרון שאני רוצה לספר לכם עליו, הוא חומר שנקרא Weyl semimetal, והחומר הזה הוא חומר שהתגלה ממש בשנים האחרונות. התכונות של החומר הזה הן ממש תכונות שקשה לדמיין! שוב, גם לחומר הזה יש איזשהם מצבי שפה, שנקראות קשתות של פרמי, והתכונה המעניינת שקורית, היינו מצפים שהאלקטרונים יזרמו על שפת החומר, במקרה הזה גם התוך של החומר הוא מוליך, אבל מה שקורה, אם אנו משרים איזשהו שדה מגנטי בניצב לדוגמה, אנו נקבל את ההתנהגות האלקטרונים הבאה. נקבל אלקטרונים שנעלים במסלולים הבאים – על השפה, ואז באיזשהו שלב חודרים לתוך החומר, יוצאים מצד המתכת השני, ונעים לאזור אחר, ושוב חודרים לתוך החומר מבצעים את המסלולים האלה, מסלולים ציקלוטרוניים שממש לא אינטואיטיביים ומוכתבים בגלל המבנה הפנימי של החומרים האלה. הסיפור נעשה אפילו יותר מעניין כשמוסיפים שדה חשמלי, אז מקבלים חומר שהוא בכיוון אחד הוא מוליך רגיל אבל בכיוון אחר הוא מוליך מושלם. את המערכת הזאת אנו מדדנו בכמה החודשים האחרונים ובוא נראה את המדידות ומה, לאיזה מסקנות הגענו. שוב אראה לכם אחד מהדברים שמצאנו. מה שקורה במערכות האלה, במערכת הזאת במיוחד, וגם במערכות טופולוגיות אחרות, זה שהמצבים הטופולוגיים באמת יש להם התכונה המיוחדת הזאת ואת ההתנהגויות המשונות אבל בד"כ הם חיים גם עם מצבים טריוויאליים על פני החומר שלנו ואנו צריכים דרך להבדיל בין המצבים הטריוויאליים לטופולוגיים. הטריוויאליים אפשר להוריד אותם על ידי מניפולציות אבל אנו רוצים בעזרת ה-STM להבדיל ביניהם.

בעבודה הזאת אנו מצאנו ממש שיטה ספקטרוסקופית שמאפשרת לנו להבחין בין שני המצבים האלה. זו שיטה שהיא אפליקטיבית גם לחומרים אחרים שיש להם את אותו מצב של מצבים טופולוגיים ומצבים טריוויאליים. פה אנו רואים את פני שטח של החומר, ומה שאנו רואים פה זה אזורים קטנים שפשוט חסר אטום. בנקודות מסוימות חסר אטום. והחוסר באטום אלה אותם הפרעות שקטנות שאנו מכניסים לים האלקטרונים וסביב האזורים האלה באמת רואים שכשאנו מודדים מפה של צפיפות המצבים אנו רואים שנוצרים לנו מין ריפלט קטנים, מין אדוות קטנות, והאמת שאנו רואים גם כבר בתמונה הזאת, אנו רואים גם את המבנה האטומי של החומר. אוקיי, אז אמרנו שמה שאנו רואים כאן זה את הגלים של האלקטרונים. אותם גלים של האלקטרונים שמשותפים באותם מצבים טופולוגיים, שמרכיבים את ההולכה של המצבים הטופולוגיים וגם של הטריוויאליים. כדי לעשות איזשהו סדר בבלגן, כי כאן אנו רואים איזשהם גלים אבל לא ממש יכולים להגיד איזה תכונות יש להם, מה התנע שלהם. אנו עושים איזשהו פירוק פורייה, מסתכלים במרחב אחר על התמונות האלה, ואז זה הנתון שאנו מקבלים וזה ה-data שאנו צריכים להתמודד איתו וצריכים לדעת מה מהדבר הזה מראה לנו מצב טופולוגי ומה מהדבר הזה מראה לנו מצב טריוויאלי. שימו לב, כל פטרן מדבר על סוג אחר של מצב. יש פה אליפסות, יש פה צורות אחרות של מצבים, ומה שאנו גילינו בחומר הזה זה ששימו לב, חלק מהפטרנס, חוזרים על עצמם ומופיעים גם פה במרכז וגם באזורים גבוהים יותר, כשהאזורים האלה מקבילים לאזורים גבוהים בפיזור. כלומר אם משווים את זה לפיזור אלקטרונים, אזורי בראג-פיק גבוהים יותר. כלומר כשאנו רואים מצבים שחוזרים על עצמם, בעזרת ניתוח מעמיק באנרגיות שונות ושל החומרים אנו יכולים להבין שהמצבים שחוזרים הם מצבים שהם טריוויאליים, כלומר מצבים לא טופולוגיים, והמצבים האלה הם מצבים שמרגישים, הם קשורים באופן די חזק למבנה האטומי של פני השטח. לעומת זאת, המצבים שאנו... הפטרנס שאנו רואים

אותם מרוכזים רק קרוב למרכז התמונה או שמופיעים רק בריבוע המרכזי ולא יוצרים פטרנס גם בברג-פיקס גבוהים יותר, אנו יודעים להגיד שהמצבים האלה הם מצבים טופולוגיים. זה איזשהו כלי ספקטרוסקופי שאפשר להשתמש בו גם בחומרים אחרים.

הדבר האחרון שאני רוצה להגיד זה שכל העבודה הזאת, וכל ההתנהלות במעבדה היא מאד כיפית, נורא נעימה. יש לנו קבוצה נהדרת וי שלנו פה, לפני כן אני רוצה לומר שיש לנו איזשהו מכשיר שאם אנו חושבים על התחום של מחקר מערכות אלקטרוניות, התחום הזה הוא תחום יחסית צעיר, והפוטנציאל הגלום במכשיר הזה הוא עדיין לא מוצה. ותוך כדי המדידות שלנו אנו מנסים להבין גם מה הגבולות ולפתח את המכשיר ולגלות דברים חדשים ויותר מזה, ההסתכלות על ה-data שאנו מקבלים, גם היא עוד עדיין אמנות בהתהוות, ולדוגמה המכשיר הסטרטרוסקופי הזה שגילינו היא דרך להרחיב את האנליזה שיש לנו על החומרים האלה ועם המכשיר הזה אנו מודדים מערכות אלקטרוניות שנמצאות בחזית המחקר של מערכות אלקטרוניות ככה שהולכות צד בצד עם התיאוריה, ומאפשרות גילוי של תופעות חדשות, מרתקות, שגם יהיה להם שימוש באפליקציות טכנולוגיות.

זהו. תודה רבה. [מחיאות כפיים]