

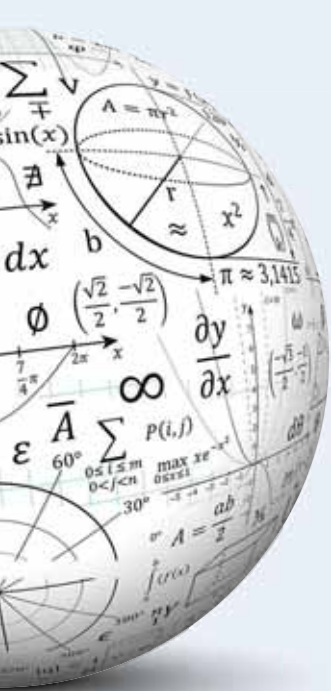
אור ואי-סדר



מאת פרופ' מוטי שגב

הנושא "הולכה חשמלית" נלמד בשיעורי פיזיקה בכיתה י', בפרקים הדנים בחוק אוהם ובחוקי קירכהוף. פרקים אלה נלמדים בדרך כלל לאחר הפרקים על חוקי ניוטון, המקשרים בין כוח, תאוצה, מהירות ודרך. לעתים תלמיד או תלמידה יצירתיים ישימו לב שקיימת סתירה לכאורה בין חוקים אלה בכל האמור על אודות הולכה חשמלית במוליכים מוצקים. לצורך הדיון נתבונן בתיל מחומר מוליך אשר מחובר למקור מתח חשמלי בשני קצותיו באופן שזורם בו זרם. כאשר התיל אינו נוגע במוליכים אחרים, הזרם אחיד לאורך התיל ושווה ליחס בין המתח שבין קצוות התיל להתנגדות שבתיל – זהו חוק אוהם. חוק קירכהוף מבטיח שהזרם אינו משתנה לאורך התיל כיוון שאינו נוגע בשום מוליך אחר. מנגד, הסיבה להולכה היא הכוח שמפעיל השדה החשמלי על החלקיקים נושאי המטען החשמלי (בניח שאלה אלקטרונים). לפי חוקי ניוטון, הכוח החשמלי הפועל על האלקטרונים גורם להאצתם, ולכן מהירותם גדלה בהתמדה ככל שיתקדמו בתוך התיל. אולם הזרם החשמלי יחסי למהירות התנועה של המטען החשמלי, והיות שמצאנו שהמהירות עתידה לגדול עם ההתקדמות בתיל, בשל הכוח, הרי שגם הזרם עתיד לגדול לאורך התיל. במילים אחרות, על פי חוק אוהם הזרם בתיל קבוע (תוצאה המתאימה לחוק שימור המטען החשמלי), ואילו על פי חוקי ניוטון הזרם בתיל גדל עם ההתקדמות בתיל. האם תיתכן סתירה בין חוקים בסיסיים כל כך בפיזיקה?

מובן שלא. הפתרון נעוץ בעובדה שהאלקטרונים הנעים בתיל אינם נעים בחלל ריק אלא בתוך מוליך מוצק המורכב מאטומים. בעיה זו הייתה על סדר היום המדעי כשבעים שנה, עד שנת 1900, אז הציע הפיזיקאי פול דרודה את המודל המיקרוסקופי הראשון לתיאור ההולכה של חלקיקים נושאי מטען במוליכים מוצקים. זה היה אך שלוש שנים מאז גילוי האלקטרון (על ידי תומפסון, 1897) כחלקיק נושא מטען חשמלי, ולכן היה הגיוני לנסות לתאר הולכה חשמלית דרך תנועה של חלקיקים. דרודה הניח שהאלקטרונים הם "כדורים קטנים" אשר אכן מואצים על ידי השדה החשמלי, אולם האלקטרונים מתנגשים במהלך תנועתם לעתים תכופות באטומים של החומר – "כדורים גדולים" הרבה יותר. בטמפרטורת החדר אטומי החומר נעים במהירויות גבוהות, ולכן כל התנגשות עם אלקטרון גורמת לחלקיק הקטן יותר לנוע במהירות גבוהה הרבה יותר. היות שתנועת אטומי החומר אקראית לחלוטין, גם התנועה התרמית של האלקטרונים (אשר מקורה בהתנגשויות עם אטומי החומר) אקראית לחלוטין. נוסף על תנועה אקראית זו, יש לתנועת



תשובות לתיאור שלם יותר של תנועת אלקטרונים בחומר מוצק החלו להופיע לאחר לידתה וביסוסה של תורת הקוונטים. הירייה הראשונה להבנת תכונות הולכה של גלים (כולל תופעות התאבכות) נורתה על ידי הפיזיקאי היהודי, חתן פרס נובל פליקס בלוך. בתקופתו של בלוך האמינה הקהילה המדעית שכל המוצקים בטבע בנויים מאטומים/ מולקולות המונחים באופן מחזורי זה ליד זה ויוצרים גביש מחזורי ומסודר. אי לכך שאף בלוך להבין כיצד מתנהגים אלקטרונים במבנים כאלו במסגרת תורת הקוונטים. בעבודת הדוקטור שלו (1928) פתר בלוך את משוואת שרדינגר (המשוואה הבסיסית של תורת הקוונטים) בדבר אלקטרונים הנעים במבנים מחזוריים. בלוך התייחס לאלקטרונים כאל גלים וחישב את ההתאבכות הנוצרת בשל המבנה המחזורי. החישוב של בלוך הניח את היסודות להבנה של תנועת אלקטרונים בגבישים, ובמידה רבה הנדסת המיקרואלקטרוניקה היא פועל יוצא של עבודה זו. אלא שגם התיאור של בלוך לא היה מלא, ואף שהתאים לניסיונות רבים – לא הצליח להסביר תופעות רבות אשר נצפו בניסויים. למשל, תיאורו של בלוך לא הצליח להסביר מדוע גביש מוליך אשר נוצרים בו פגמים אקראיים בצפיפות מספיקה הופך למבודד חסר הולכה חשמלית לחלוטין. התאוריה של בלוך מתבססת על מבנה מחזורי מושלם. אולם מבנה כזה קיים רק בתאוריה: בכל מערכת בטבע קיים גם אי־סדר במידה מסוימת. לכן כדי לתאר הולכה בחומרים שונים עלינו להניח שאף על פי שמוצקים בטבע הם מבנים מחזוריים בבסיסם, יש בהם מידה מסוימת של אי־סדר – חלקיקים שאינם נמצאים במקומם ואפילו חלקיקים מסוג שונה המפוזרים בתוך המבנה המחזורי באופן אקראי ולא צפוף במיוחד. בשנת 1958 הפתיע פיזיקאי אמריקאי פיליפ אנדרסון את הקהילה המדעית כאשר התייחס להתנהגותם הגלית של האלקטרונים במבנים מחזוריים (גבישים) שיש בהם גם מידה מסוימת של אי־סדר. בניגוד לדעה הרווחת עד אז, שלפיה אי־סדר אמנם מפריע להולכה

האלקטרונים גם רכיב כיווני – בשל האצתם על ידי השדה החשמלי – אולם רכיב זה קטן מאוד (שוב, בטמפרטורת החדר), כאשר בכל התנגשות עם אטום מוקנית לאלקטרון מהירות אקראית גדולה הרבה יותר. בעקבות זאת האלקטרונים מבצעים בחומר תנועה אקראית הנקראת "הילוך שיכור" במהירויות גבוהות, ונוסף על כך הם נעים – בממוצע במהירות נמוכה מאוד – בכיוון הנקבע על ידי השדה החשמלי. מהירותם הממוצעת אכן יחסית לשדה החשמלי המופעל עליהם, לפי חוק אוהם. אפשר לדמות את האלקטרונים ל"ענן" יתושים הנסחף ברוח, כאשר מהירות הסחיפה קטנה אלפי מונים מהמהירות האקראית של היתושים בתוך הענן. ואכן מהירות ההולכה של אלקטרונים במוליך מוצק נקראת מהירות הסחיפה. בבסיס התיאור של דרודה עומדת ההתנהגות החלקיקית של האלקטרונים – ככדורי ביליארד קטנים המבצעים "הילוך שיכור". מודל זה אכן התאים לחלק לא מבוטל של ניסויים בהולכת זרם חשמלי במוליכים. אולם כבר כמה שנים לאחר מאמרו של דרודה היה ברור שהתמונה הרבה יותר מורכבת, ושהנחת היסוד שלו – שנשאי המטען החשמלי הם חלקיקים – איננה מספקת. למעשה, אנו יודעים היום שלחלקיקים אלמנטריים (כגון אלקטרונים) התנהגות גלית, ושהם מאופיינים גם בתופעות גליות של התאבכות ועקיפה. לפיכך היינו מצפים כי אם לאלקטרונים תכונות גליות, הרי שהם מסוגלים להתאבך ביניהם ואפילו לבצע עקיפה של "מכשולים" בדומה לגלים בים שעוקפים ספינה או מצוף. אי לכך, ההנחה המרכזית של דרודה – שהאלקטרון הוא חלקיק ("מעין כדור ביליארד קטן") הנע בקווים ישרים – אינה נכונה.



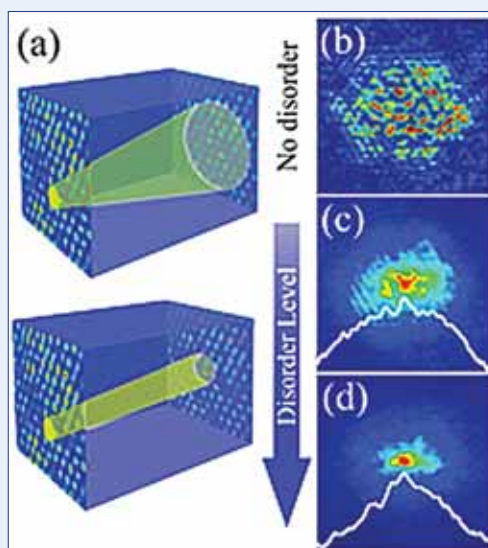
החשמלית שלו ומתנהג כמבודד. תופעה זאת נקראת "מיקום ע"ש אנדרסון" – Anderson Localization – על שם מגלה התופעה.

מיקום האלקטרונים בגביש, ועמו אבדן ההולכה החשמלית בגביש, קורים בגלל התאבכות המתרחשת בין החזרות מרובות של "גל האלקטרון" מאי-הסדר בגביש. לא ממש הבנתם את ההסבר? אתם בחברה טובה. אנדרסון עצמו התייחס לתופעה מעל הבימה, בקבלו את פרס נובל בפיזיקה (1977):

Localization was a different matter: very few believed it at the time, and even fewer saw its importance; among those who failed to fully understand it at first was certainly its author. It has yet to receive adequate mathematical treatment, and one has to resort to the indignity of numerical simulations to settle even the simplest questions about it.

תופעת המיקום הייתה שנויה במחלוקת תקופה ארוכה, בין היתר חלק עליה סר נאוויל מוט, אשר זכה בפרס נובל עם אנדרסון יחד. יתר על כן, מתברר שניסוי מעבדה אשר מסוגל להוכיח (או להפריך) את הרעיון בצורה ישירה קשה מאוד לביצוע על אלקטרונים, וייתכן שאפילו בלתי אפשרי. הסיבה היא שתיאור התופעה (המודל של אנדרסון) מיועד לחלקיקים אשר אינם משפיעים זה על זה, אולם אלקטרונים בהכרח משפיעים זה על זה: הם דוחים זה את זה ומסוגלים להחליף ספין זה עם זה (סוג של תנע זוויתי). הנה כי כן, עד שנת 1977 (שנת הנובל של אנדרסון) היו רק הוכחות ניסוייות עקיפות לנכונות הרעיון. שנים אחדות לאחר מכן הציע חוקר צעיר בשם סג'יב ג'והן, שהרעיון הבסיסי של "מיקום בעקבות אי-סדר" יפעל גם עם גלים קלסיים (ללא אפקטים קוונטיים מובהקים כגון שזירות). בעקבות ג'והן הועלו הצעות לניסויים בגלי אור, ואת החשוב שבהם העלתה קבוצה הולנדית בראשות אד לחנדייק. כל הרעיונות האלה התבססו על העובדה שאור מתפזר בשל שינויים אקראיים במקדם השבירה בחומר, והתאבכות בין פיזורים רבים מאוד

אך אינו מבטל אותה, הראה אנדרסון שהוספת אי-סדר למבנה מחזורי שבו נעים החלקיקים (כמו אלקטרונים), אפילו במידה מועטה, יכולה לבטל את תכונת ההולכה של החומר לחלוטין. אנדרסון הראה שבתנאים מסוימים אי-הסדר ממקם את החלקיקים (לדוגמה, אלקטרונים נושאי הזרם החשמלי) בתוך אזור תחום אשר ממנו הם אינם יכולים לצאת. לתגלית זו משמעות במערכות פיזיקליות רבות. לדוגמה, במצב כזה בחומרים בעלי תכונות הולכה חשמלית לא יכול להתפתח זרם, ולכן החומר מאבד את תכונת ההולכה



ריסון התפשטות אור על ידי אי-סדר: הניסוי של טל שורץ וגיא ברטל במכניון, שהוכיח לראשונה שהוספת אי-סדר למערכת מחזורית (במקרה זה – גביש פוטוני) גורמת לתופעת מיקום לפי אנדרסון. (א) סכמת הניסוי: אלומת אור צרה מתקדמת בתוך גביש פוטוני (מוצק שבו מקדם השבירה מחזורי – משולשים זהים, במקרה זה) המכיל אי-סדר (פגמים במבנה המחזורי) במידה נשלטת. כאשר אי-הסדר בגביש חלש, אלומת האור מתרחבת מאוד לאחר מרחק קצר (שרטוט עליון), והיא מקבלת צורת משושה (תצלום ב) המייצגת את הסימטריה בגביש. כאשר אי-הסדר מתחזק, אלומת האור מתרחבת פחות, והיא מקבלת צורת פעמון (תצלום ג). כאשר אי-הסדר חזק מספיק, אלומת האור איננה מתרחבת כלל, וצורתה מאופיינת בדעיכה אקספוננציאלית ממרכזת בכל כיוון (תצלום ד), בדיוק לפי התחזית של אנדרסון מ־1958.



כל כך ולבחון את הרעיון בניסוי? לשאלה זאת שתי תשובות: הראשונה – כי פיזיקה היא בראש ובראשונה מדע ניסויי, ואי אפשר להחליף ניסוי בחישוב או בסימולציה מחשב. לסימולציה יכולת לבחון מודל מסוים, בתנאי פתיחה נתונים, אולם כל ממצאה מוגדרים מראש על ידי המשוואות שאותן היא פותרת ועל ידי תנאי הפתיחה. אין לה יכולת לייצר הפתעות, כגון תופעה חדשה שאיננה מתוארת על ידי המשוואה שהמחשב פותר. לעומת זאת ניסויים תמיד יכולים לייצר הפתעות. הסיבה השנייה, חשובה מן הראשונה: ניסויים תמיד מובילים לרעיונות חדשים. ואכן, כבר המאמר שלנו מ־2007 כלל הפתעה אחת לפחות: הגברת עצמת אלומת האור גרמה לאפקטים לא־ליניאריים בחומר, אשר הייתה להם השפעה ניכרת על תכונות ההולכה. מקדם השבירה עלה בנקודות שבהן עצמת אלומת האור הייתה גבוהה, ובעקבות זאת זיהינו בניסויים (ואחר כך גם בסימולציות) שאפקטים לא־ליניאריים מסוגלים לקדם (או לדחות) את תופעת המיקום על ידי אי־סדר.

בשנים שעברו מאז העבודה הראשונית ב־2007 גילינו מספר רב של תופעות חדשות הקשורות למיקום על ידי אי־סדר. למשל, ב־2011, בשיתוף עם דוקטורנט שלי בשם ליעד לוי ועם מיכאל רכטסמן, פוסט־דוקטורנט שלי, הצלחנו להראות שהוספת אי־סדר למבנים קוואזי־מחזוריים מגבירה את תכונות ההולכה של חומרים אלה, ואף להסביר את

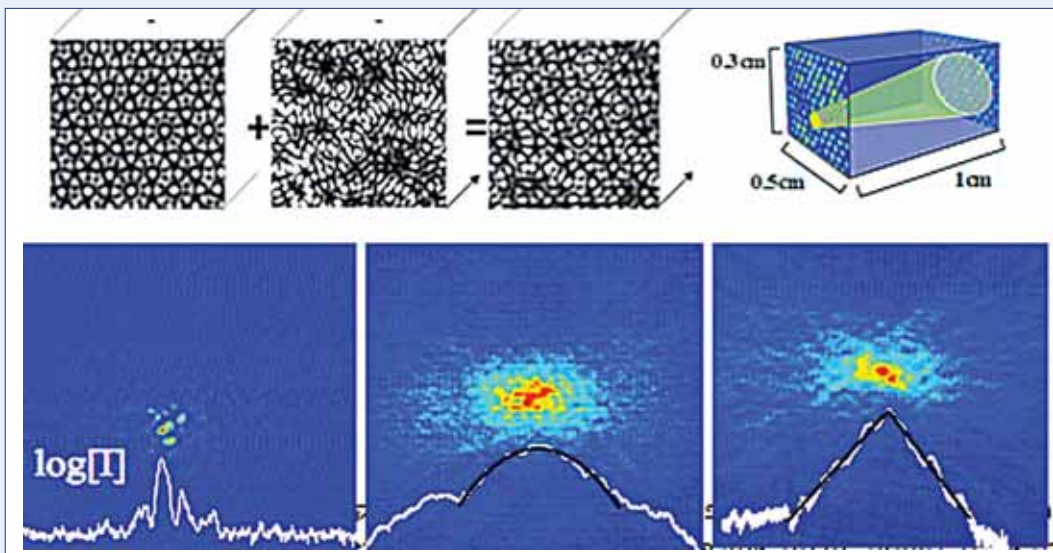
מונעת מהאור לעבור דרך התווך המפזר. התופעה דומה במידה מסוימת לניסיון העברת קרן לייזר דרך קוביית סוכר. קוביית הסוכר עשויה מהרבה מאוד גבישונים זעוריים, ולכן אור לייזר הפוגע בה מתפזר לכל הכיוונים, והקובייה ממש "זורחת", ואך מעט מאוד אור מצליח לעבור דרכה ישירות.

משנת 1997 ואילך נעשו כמה ניסויים שחקרו תופעות פיזור של אור בתווך בעל שינויים אקראיים במקדם השבירה (כגון כדורים זעירים בתוך נוזל) וניסו לקשור את פיזור האור לרעיון של "מיקום על פי אנדרסון". אולם הניסוי הראשון ששחזר את התנאים המדויקים שבהם פתר אנדרסון את שאלת ההולכה במבנים מחזוריים בנוכחות אי־סדר בוצע רק בשנת 2007, בקבוצת המחקר שלי בטכניון. עם שני דוקטורנטים שלי, טל שוורץ וגיא ברטל (כיום חברי סגל בפקולטה לכימיה באוניברסיטת תל־אביב ובפקולטה להנדסת חשמל בטכניון), ובשיתוף פעולה עם חברי פרופ' שמואל פישמן, תכננו מערכת אופטית שהצליחה לממש את התנאים שעליהם דיבר המאמר של אנדרסון משנת 1958 ולהראות לראשונה באופן ישיר בניסוי את תופעת המיקום על פי אנדרסון. כשנה לאחר מכן הצליח יואב לחיני והמנחה שלו לדוקטורט פרופ' ירון זילברברג, שניהם ממכון ויצמן, לממש מערכת דומה ולחקור כיצד צורות הגל האופטי בתווך הופכות מפונקציות מחזוריות המאפיינות גביש מושלם (לפי תורתו של פליקס בלוך) לפונקציות ממוקמות (לפי אנדרסון). סדרת עבודות זו יצרה כיוון חדש במדע. בתוך זמן קצר נעשו ניסויים דומים על אטומים קרים – בטמפרטורות נמוכות מאוד האטומים מתנהגים כגלים – על גלי קול ועוד. האיור לעיל מראה סכמטית את הניסוי ותוצאותיו.

אולם לפני שנמשיך בתיאור השתלשלות המחקר, עלינו להעלות שאלה בסיסית על משמעות מחקר זה. מדוע בכלל כדאי היה לבצע את הניסויים האלה? הניסוי ערך כשנתיים וחצי עד להצלחה מלאה. הושקעו בו משאבים רבים. אולם הרעיון קיים מ־1958, והוא הוכח מאז מתמטית, ולכן היה ברור שניסוי מתאים יפיק את התוצאות המצופות. מדוע אפוא להתאמץ

המרכזיים של מערכת הניסוי ואת התוצאות. בחלק העליון מצד שמאל אפשר לראות את הגביש הקוואזי-מחזורי. במבט ראשון נראית התבנית מסודרת ומחזורית, אך מבט חוזר בפרטים שבתמונה יגלה שלמעשה אין מחזוריות אמיתית (אין "תא יחידה" החוזר על עצמו). על גבי המבנה הזה הוספנו תבנית של "אי-סדר" – המבנה "מבולגן" – והתקבלה תבנית הגביש הקוואזי-מחזורי בתוספת אי-סדר. אל תוך התבנית הזאת שיגרנו אלומת אור לייזר ירוקה (חלק עליון, צד ימין) שהתפשטה בתוכה למרחק בן סנטימטר. קרן האור ששוגרה לתוך התווך התפשטה בגביש הקוואזי-מחזורי וגם התפזרה מאי-הסדר. מבנה אלומת האור ביציאתה מהקוואזי-גביש תועד באמצעות מצלמה. הניסוי הזה בוצע על קוואזי-גביש נקי (חלק תחתון, צד שמאל) ועל מצבים שבהם הוספה לקוואזי-גביש מידה הולכת וגדלה של אי-סדר, עד ששאריות המבנה הקוואזי-מחזורי נמחקו לחלוטין (חלק תחתון, צד ימין). אפשר לראות בבירור כיצד בנוכחות מידה מסוימת של אי-סדר (חלק תחתון, אמצע) מתרחבת

המנגנון הפיזיקלי העומד מאחורי תופעה זו. כל זאת בניגוד לדעה הרווחת שלפיה קיומו של אי-סדר בתוך גבישים תמיד מדכא את תכונת ההולכה של חומרים ולא מגביר אותה. השתמשנו במערכת אופטית כדי לבנות גביש קוואזי-מחזורי (קוואזי-גביש) פוטוני, הוספנו לו אי-סדר ושיגרנו לתוכו אלומת אור כדי לעקוב אחרי התפשטות האור בתוכו. זה המקום לציין כי קוואזי-גבישים התגלו על ידי פרופ' שכטמן ב-1982 (זוכה פרס נובל 2011), ותכונותיהם הבסיסיות נחשפו על ידי הפרופסורים דב לוי (מהטכניון) ופול שטיינהרדט (מפרינסטון), אשר זכו בפרס באקלי היוקרתי על תגליתם. אולם תופעות מהסוג שחקרנו בהקשר של הולכה בקוואזי-גבישים לא היו ידועות כלל. הרעיון למחקר הספציפי שלנו הועלה לראשונה בדיון ביני לבין שלושה דוקטורנטים שלי, ברק פרידמן, טל שוורץ ועופר מנלה, לקראת סיום עבודת הדוקטור שלהם (2008), אולם חלק מהותי בבעיה "פוצח" רק לפני כשנתיים, על ידי ליעד לוי ומיכאל רכטסמן. האיורים שבתחתית עמוד זה מתארים את המרכיבים



התצלומים ב-2 מייצגים את צורת אלומת האור ביציאתה מהקוואזי-גביש הפוטוני, לאחר מיצוע על 100 ניסויים בכל אחת מדרגות החוזק של אי-הסדר. הגרפים ב-3 וב-2 מראים חתכים דרך מרכז האלומה בסקלה לוגריתמית, ומייצגים מעבר מהתפשטות בליסטית (ב) לדיפוזיבית (דמוית הילוך שיכור) הרחבה מההתפשטות הבליסטית ולבסוף לעצירה מוחלטת של התרחבות האלומה (ד), עם התחזקות אי-הסדר.

המבוססות על חוקי ניוטון (מודל חלקיקי). עבודה תאורטית וניסויית של דוקטורנט צעיר שלי, חנן שינפוקס, ובשיתוף עם מסטרנט שלי, רומן קרייזרמן, מוכיחה שככל הנראה הצדק עמדי, אבל עוד צפויות לנו הפתעות רבות במחקר זה.

למסקנות העולות ממחקרינו אלה השלכות חשובות הן על חקר ההולכה של אלקטרונים במוצקים והן על חקר מעבר גלים אלקטרו־מגנטיים, גלי קול וגלי חומר (אטומים קרים מאוד) דרך חומרים ומבנים שונים. מחקרנו אמנם ענו על כמה שאלות בסיסיות במדע, אולם בה בעת פתחו שאלות ואפיקי מחשבה חדשים. אסיים ואומר שבשבילי המחקר תמיד היה הרפתקה מרתקת, מלאת הפתעות ותהפוכות. אין רגע דל, ובדרך כלל – המעניין ביותר עוד מצפה לנו מעבר לפינה!

למעוניינים להרחיב, אמליץ לקרוא את המאמרים הרלוונטיים שלנו:

1. T. Schwartz, G. Bartal, S. Fishman, and M. Segev, "Transport and Anderson Localization in disordered two-dimensional Photonic Lattices", *Nature* 446, 52 (2007).
2. L. Levi, M. Rechtsman, B. Freedman, T. Schwartz, O. Manela, and M. Segev, "Disorder-enhanced transport in photonic quasicrystals", *Science* 332, 1541 (2011)
3. M. Rechtsman, A. Szameit, F. Dreisow, M. Heinrich, R. Keil, S. Nolte, and M. Segev, "Amorphous photonic lattices: band gaps, effective mass, and suppressed transport", *Physical Review Letters* 106, 193904 (2011).
4. Levi, Y. Krivolapov, S. Fishman, and M. Segev, "Hyper-transport of light and stochastic acceleration by evolving disorder", to appear, *Nature Physics*, December 2012.

אלומת האור הרבה יותר מאשר במקרה שבו אין אי־סדר כלל (חלק תחתון, צד שמאל) – עדות ישירה לכך שהוספת אי־סדר למבנה הקוואזי־מחזורי מגבירה את תכונת ההולכה. כמובן כאשר אי־הסדר חזק מספיק, המבנה הקוואזי־מחזורי נהרס וחוזרים לתמונה של מיקום על פי אנדרסון (חלק תחתון, צד ימין).

נוסף על חקר ההולכה בגבישים קוואזי־מחזוריים בנוכחות אי־סדר, פרסמנו בשנה שעברה מחקר ראשון מסוגו על חומרים פוטוניים אמורפיים – שבהם לא רק שאין סדר כלל אלא שלמעשה אין כמעט כל תאימות (קורלציה) בין המבנה בנקודה אחת בחומר למבנה בכל נקודה אחרת. רעיונית, מבנים אמורפיים הפוכים למבנים קוואזי־מחזוריים, שבהם קיימת תאימות למרחקים ארוכים מאוד אף על פי שאין בהם מחזוריות כלל. בניסויים שלנו ובתאוריה שפיתחנו הראינו שאפשר לבנות מערכות אמורפיות בעלות "פער פוטוני": רצף של מצבים שאותם אין האור יכול לאכלס.

לבסוף, במחקר מהזמן האחרון ממש (שיתפרסם בדצמבר 2012) הראינו, ניסויית ותאורטית, שכאשר אי־הסדר במרחב משתנה באופן אקראי גם בזמן (רטט אקראי), אלומת האור מתרחבת מהר יותר (לעתים בהרבה) – אפילו מהתרחבותה הבליסטית בתווך אחיד (למשל באוויר). קראנו לתופעה "היפר־טרנספורט", לציין שההתפשטות מהירה אפילו מהתפשטות בליסטית. תוצאה זאת התגלתה בניסוי של הדוקטורנט שלי ליעד לוי, ולמען האמת פקפקתי בה בשלב הראשוני. אולם בהמשך, תוך שיתוף פעולה צמוד עם ליעד, עם פרופ' פישמן ועם הדוקטורנט שלו יבגני בר־לב (לשעבר קריבולפוב), הצלחנו לפתח את התאוריה ולהבין את התופעות לפחות כאשר השינוי הזמני של אי־הסדר אטי למדי, ואפשר לייצג את התופעה באמצעות חלקיקים. אולם במחקר כמו במחקר – אין רגע דל. בימים אלה ממש ניטש ויכוח משמעותי ביני לבין פרופ' פישמן וד"ר בר־לב על תופעת ההיפר־טרנספורט במשטר שבו אי־הסדר משתנה בזמן מהר מאוד – עד כי לדעתי אי אפשר לתאר את התופעות באמצעות משוואות