

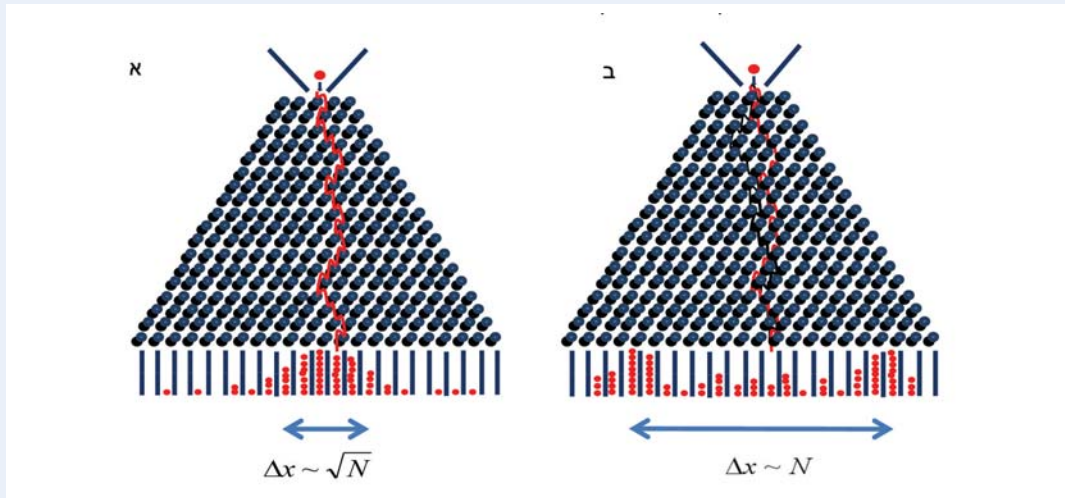
# על הליכה קוונטית של פוטונים



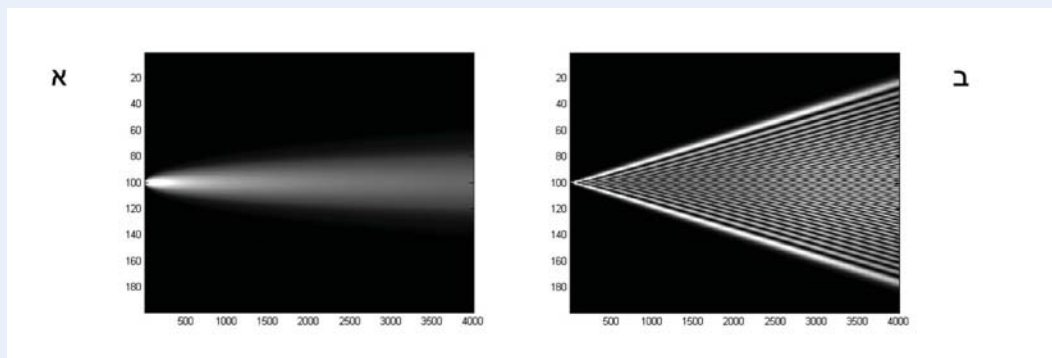
## מאת פרופ' ירון זילברברג

שבבסיסה של תורת ההסתברות: כאשר מפילים כדורים רבים, הם מצטברים בערמה שמרכזה מתחת לנקודת ההתחלה, צורתה כעקומת פעמון (התפלגות נורמלית), ורוחבה פרופורציוני לשורש מספר ההתנגשויות. תהליכים אקראיים כאלה מתארים למשל תנועה של מולקולת גז או נזל המתנגשת ומוסטת באקראי, ואכן כידוע גודלו של כתם העובר דיפוזיה מתרחב באופן מתכונתי לשורש הזמן.

אשר ביקש סר פרנסיס גלטון להדגים לחבריו את עקרונות תורת ההסתברות שאותה עזר לפתח, הוא בנה את המתקן המתואר באיור 1א. במתקן זה, שנודע כיום כ"לוח גלטון", כדורים נופלים מטה תוך כדי התנגשות במוטות שגורמים להם לסטיות אקראיות, ימינה או שמאלה. התהליך שכל כדור עובר ידוע כהליכה אקראית או "הליכת שיכור" שפוסע ימינה ושמאלה באקראי. המתקן מדגים את "משפט הגבול המרכזי"



איור 1: (א) חלקיק קלאסי הנופל בלוח גלטון מוסט על ידי המוטות ימינה ושמאלה באקראי. הסיכוי להגיע לנקודת סיום מסוימת מתקבל מסך כל המסלולים המגיעים אליה (למשל המסלול האדום), ולאחר מספר גדול של צעדים ההתפלגות מתוארת בעקומת פעמון (התפלגות נורמלית); (ב) חלקיק קוונטי דוגם בעת ובעונה אחת את כל המסלולים האפשריים (למשל האדום והשחור) שמתאבכים ביניהם. ההתפלגות שנוצרת מההתאבכות מרוכזת בקצוות ומתרחבת לינארית עם מספר הצעדים.



איור 2: הילוך אקראי של חלקיקים קלאסיים אחראי למשל לתהליכי דיפוזיה, כמתואר באיור למעלה: חלקיקים הנמצאים תחילה בנקודה אחת יתרחקו עם הזמן, ועקומת הפעמון המתארת את מיקומם תגדל עם שורש הזמן (או מספר ההתנגשויות). הילוך קוונטי (מימין) מנבא התרחבות לינארית בזמן, כאשר פונקציית ההסתברות מרוכזת בשתי האונות הקיצוניות, הנקראות גם האונות הבליסטיות.

שיכול לדלג מאטום לאטום בגביש, מבצע הילוך קוונטי שכזה. אלקטרון שידוע לנו שהיה ברגע נתון באטום מסוים, אחרי זמן מה הוא יתקדם במעברים אקראיים לאטומים אחרים, ופונקציית ההסתברות למצוא אותו במקום מסוים תתרחב עם הזמן כמתואר ◀



**סר פרנסיס גלטון**  
(1822-1911) היה מדען אנגלי, בן דודו של צ'רלס דרווין, שתרם למספר לא קטן של מדעים ומכניקות. הוא נשכח במידה רבה, אולי מפני שיצירתו העיקרית - מדע היוגניקה, או התורשה של האינטליגנציה - התפתח בהמשך לתורה גזענית שנוצלה בין השאר על ידי הנאצים.

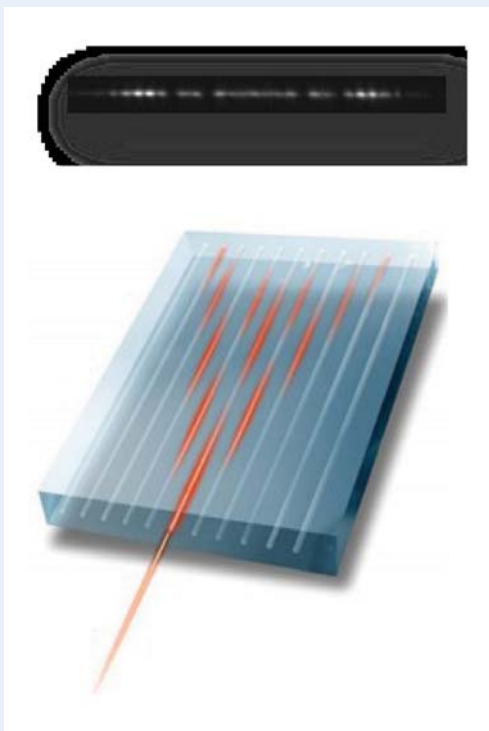
אולם גלטון תרם רבות לנושאים רבים אחרים ובמיוחד לפיתוחה של ההסתברות כתורה מדעית. הוא שעמד על חשיבותן של הקורלציות בין משתנים ועל חשיבותה של ההתפלגות הנורמלית (ולשם כך בנה את המתקן הידוע). הוא נחשב גם לאבי תורת האקלים, למציא השאלון הפסיכולוגי ולמי שהכניס לשימוש את מביעת האצבעות כאמצעי זיהוי.

מה היה קורה אילו היינו מקטינים את לוח גלטון הקטנה קיצונית, והכדור הנופל היה חלקיק המתנהג לפי חוקי תורת הקוונטים? מתברר שההתפלגות שהיו יוצרים חלקיקים קוונטיים הנופלים בלוח גלטון כזה הייתה שונה בהרבה מההתפלגות הקלאסית: חלקיק "קלאסי" מגיע מנקודת ההתחלה לנקודת הסיום במסלול מוגדר, ואילו החלקיק הקוונטי יכול להגיע בדרכים רבות, ואין לדעת באיזה מסלול עבר (כל עוד איננו מודדים זאת ואיננו מנסים לזהות את המסלול). יתרה מזו, תורת הקוונטים טוענת שלמעשה החלקיק עבר דרך כל המסלולים האפשריים בעת ובעונה אחת, וההסתברות להגיע לנקודת סיום מסוימת היא למעשה ההתאבכות של כל המסלולים האלה. כאמור, ההבדל הזה בין "הליכה קלאסית" ל"הליכה קוונטית" מביא לפונקציית התפלגות שונה מאוד מההתפלגות הקלאסית - היא רחבה הרבה יותר, רוחבה גדל פרופורציונית למספר הצעדים (ולא לשורש שלו), והיא מרוכזת בשתי אונות הנמצאות בקצות ההתפלגות ולא במרכזה (ראה איור ב1).

הליכה אקראית של חלקיקים קוונטיים נשמעת אולי כפרי רוחו של תאורטיקן יצירתי, אבל לאמתו של דבר היא מתארת כמה מהתהליכים הבסיסיים בטבע, ולמשל את המוליכות של מתכות: אלקטרון חופשי,

מיקרומטרים), תמונת הקרניים כבר אינה תקפה, ויש לפתור את משוואות הגלים כדי לנתח את שדה האור המתקדם. נמצא שכאשר ממדי הליבה קטנים מספיק, יש התפלגות אחת ויחידה של משרעת השדה האלקטרומגנטי שמתקדם לאורכה. התפלגות זאת קבועה, ורק המופע (פאזה) של הגל משתנה תוך כדי התקדמות. זהו האטום שלנו – אור שכלוא בממד הרוחבי, אך יכול להתקדם לאורך הליבה.

נתאר לעצמנו עכשיו שבמקום ליבה אחת המוליכה את האור, שתי ליבות זהות ומקבילות מוליכות אותו. אם הן רחוקות זו מזו, האור מתקדם בכל אחת ללא קשר לחברתה. אבל כאשר הליבות קרובות מספיק זו לזו, אור המתקדם לאורך אחת מהן יזלוג בהדרגה לליבה השנייה, עד שכולו ייצא בה, ואז יחזור בהדרגה לראשונה, וחוזר חלילה. המעבר הזה מוכר היטב מהרבה תופעות פיזיקליות דומות – כך למשל עוברת



איור 3: מערך של ליבות שבהן מתקדם האור מדגים הילוך קוונטי של פוטונים. התצלום מראה את ההתפלגות האופיינית להילוך קוונטי, אף שצולם באור לייזר רגיל.

◀ באיור 2, והיא זהה להתפלגות שמנבא לוח גלטון הקוונטי. אמנם האיור מתאר את המצב הצפוי בשרשרת חד-ממדית של אטומים, אבל התהליך ניתן להכללה גם לשלושה ממדים. איש עוד לא ראה אלקטרון מבצע הליכה קוונטית כזאת, אף שהיא קיימת בבסיס ההבנה של התכונות החשמליות והאופטיות של חומרים מוצקים. היא מסבירה איך אלקטרונים יכולים לנוע למרחקים גדולים בגביש בזמן שחלקיקים קלאסיים, שהיו מתקדמים על ידי דיפוזיה, היו מוגבלים הרבה יותר בתנועתם. קשה למדוד את הדינמיקה של אלקטרון בודד, אבל ניתן לחקור את התהליכים האלה בעזרת חלקיקים קוונטיים אחרים, נוחים יותר למדידה ניסיונית. במאמר זה אסקור כמה מעבודותינו בהליכה קוונטית של פוטונים – החלקיקים הקוונטיים שמהם מורכב האור.

## אטומים לאור

כדי לבחון את ההליכה האקראית של פוטונים, יש למצוא תחילה את המקבילה האופטית לאטומים שביניהם האלקטרונים נעים. נרצה למקם את הפוטונים במרחב אך גם לאפשר להם לדלג מ"אטום" ל"אטום". אבל יש הבדל עקרוני בין אלקטרונים לפוטונים: בהיותם חסרי מסה, חייבים הפוטונים לנוע במהירות האור, ולא נוכל לכלוא אותם במקום אחד. הפתרון פשוט למדי: נכלא אותם רק בשני ממדים ונשאיר כיון אחד שלאורכו הם יתקדמו בחופשיות. ה"אטום" הבסיסי שלנו אפוא דומה למבנה הפשוט יחסית (והחשוב מאין כמוהו לטכנולוגיה המודרנית) של הסיב האופטי. סיב אופטי בצורתו האלמנטרית ביותר הוא גליל של זכוכית, שהאור המתקדם לאורכו כלוא בשל החזרה מלאה מדופנותיו. מאחר שהאור רגיש לאיכות המשטח שממנו הוא מוחזר, מוטב לכלוא את האזור שבו האור מולך – ליבת הסיב – במעטפת זכוכית אחרת, בעלת גורם שבירה נמוך יותר. כאשר ממדי הסיב מוקטנים וקוטר הליבה מתקרב לממדים של אורך הגל האופטי (כלומר כמה

שהם מתקדמים לאורך הליבות, ולכן אין צורך למדוד כלל את הזמן – אנחנו יודעים שזמנים שונים פירושו מקומות שונים לאורך הדגם. כל שעלינו לעשות הוא לשלוח אור לליבה אחת במישור הכניסה ולבדוק את ההתפלגות שלו לאחר שהתקדם כמה מילימטרים או סנטימטרים.

ואכן, התנהגותו של אור המתקדם ב"סריגים פוטוניים" דומה מאוד להתנהגותם של אלקטרונים בגבישים אטומיים, ולרבות מן התופעות שבבסיסה של תורת המצב המוצק, אך מעולם לא נצפו ישירות, שוחזרו ונמדדו במבנים הפוטוניים האנלוגיים. מובן שאין סיבה להגביל את המחקר למבנים מחזוריים דווקא, וכדי להדגים אפקטים רבים מיוצרים דגמים בעלי מבנה כנדרש. כך למשל ניתן ליצור ליבה אחת שונה מיתר הליבות ולמדוד את האפקט של פגם בגביש מסודר על התפשטות הגלים במערך. מחקרים אלה נעשו הן בעצמות אור "רגילות", שבהן כל פוטון נע ללא תלות בחבריו, וגם בעצמות גבוהות, שבהן האור משפיע על הדגם (דרך אפקטים "לא לינאריים"), שאז ניתן ללמוד על השפעתן של אינטראקציות על המהלך הקוונטי.

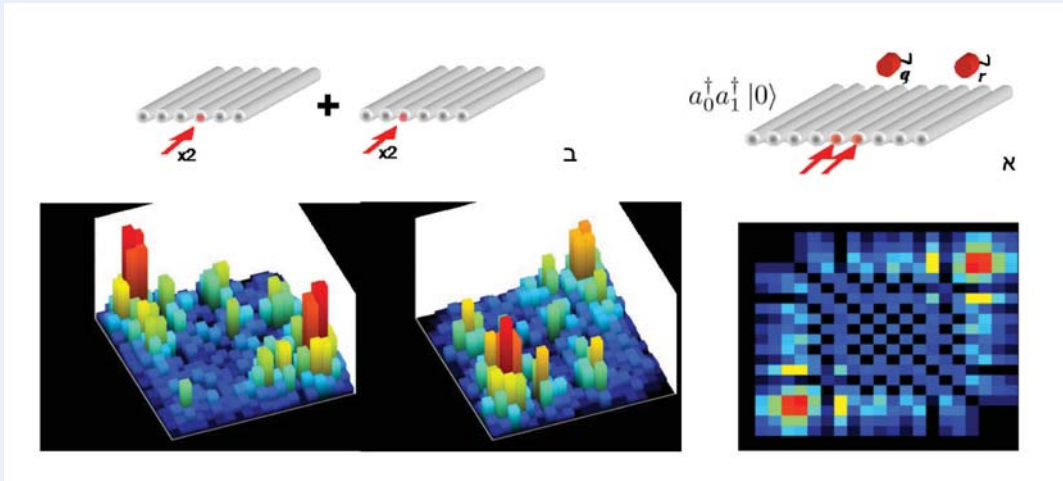
## ובכל זאת, פוטונים

כאמור, כדי לקבל את פונקציית ההתפלגות של ההילוך הקוונטי אין צורך לעסוק בפוטונים בודדים – מדידות אלו נעשו באור לייזר רגיל, המכונה גם "אור קלאסי". וזאת משום שההתאבכות שמובילה לתבנית ההילוך הקוונטי נובעת מהתכונות הגליות של החלקיקים. ובכל זאת, מה באשר לחלקיקים עצמם? האם נוכל לצפות להתנהגות שונה כאשר האור אכן יהיה מורכב מפוטונים בודדים? תורת הקוונטים מנבאת שכאשר נשלח את האור כפוטונים יחידים, אכן נוכל לצפות לאפקטים לא קלאסיים, אבל רק אם נשאל לא לאן הגיעו הפוטונים אלא מה הקורלציות ביניהם. הדבר נובע מעוד אחת מהמוזרויות של תורת הקוונטים, שכופה סימטרייה בין שני חלקיקים זהים. לעומת ◀

אנרגייה בין מטוטלות מצומדות. אילו שלחנו פוטון בודד לליבה אחת, היינו מגלים שיש לו הסתברות מסוימת לדלג לליבה האחרת, ממש כמו אלקטרון בין שני אטומים.

הצעד הבא מתבקש – נניח לא רק שתי ליבות אלא מערך שלם של ליבות, בעיקרון אפילו אין-סופי, המוצבות ברווחים שווים כמתואר באיור 3. אם נכניס אור לליבה אחת במישור הכניסה של מערך כזה, הוא יזלוג לשכנים תוך כדי התקדמות, ומשם לשכנים הבאים, וכך התפלגות האור תמשיך ותתרחב לליבות רבות יותר ויותר. זהו תהליך המזכיר מאוד תהליך דיפרקציה, שבה אלומת אור צרה מתרחבת תוך כדי התקדמות, ולכן התבנית המתקבלת מכונה לפעמים "דיפרקציה דיסקרטית". מה שחשוב מבחינתנו הוא שהתבנית של הדיפרקציה הדיסקרטית משחזרת בדיוק את פונקציית ההתפלגות של הילוך קוונטי (איור 2), שכן בראייה קוונטית התפלגות העצמה של גל האור אינה אלא ההסתברות של כל פוטון להגיע לנקודה המסוימת. ואכן, כדי לצלם את התמונה באיור 3 לא היה צורך לשלוח אור חלש במיוחד – הפוטונים מבצעים את ההילוך הקוונטי כל אחד בפני עצמו ואינם מושפעים מנוכחות פוטונים אחרים, שכן שלא כמו האלקטרונים, להם אין מטען חשמלי, ולכן אין אינטראקציה ביניהם. תמונה זו, למעשה תצלום של פונקציית ההסתברות הקוונטית, מדגימה גם את היתרון בעבודה עם פוטונים – הממדים של המבנים האופטיים גדולים מספיק, וכיוון שמדובר באור, ניתן לצלם את פונקציית ההתפלגות ישירות. קל לראות בתצלום את נטייתם של הפוטונים להתרחק מהמרכז (שלשם הוזרק האור מלכתחילה) ולהצטבר בשתי האונות החיצוניות.

יתר על כן, התקדמותו של האור במערכת זו לאורך הליבות מקלה מאוד את הניסוי. לו רצינו לבצע ניסוי כזה באלקטרונים, היינו חייבים להציב אותם תחילה על אטום יחיד, ואז לחזור ולמדוד את המיקום שלהם בזמנים שונים. גם את הפוטונים אנחנו מודדים בזמנים שונים, אבל אנחנו גם מנצלים את העובדה

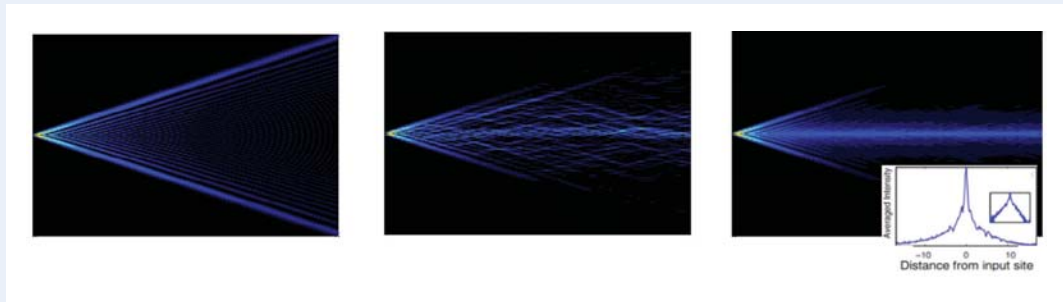


איור 4: א. מימין, פונקציית הקורלציה המחושבת כאשר שני פוטונים נשלחים דרך ליבות 0 ו-1. הצבעים מייצגים את ההסתברות למדוד ביציאה פוטונים בליבות השונות, כשברורה הנטייה שלהם לנוע יחד לאחד משני הצדדים (מאופיינת בהסתברות הגבוהה לאורך האלכסון הראשי, והנמוכה - לאורך האלכסון הנגדי); ב. במרכז ומשמאל מוצגות פונקציות הקורלציה שנמדדו בשביל פוטונים שזורים, כאשר הזוג נשלח דרך ליבה 0 או ליבה 1, כמתואר באיור למעלה. באמצעות שליטה בפאזה האופטית אפשר לשלוט בסימטרייה ולכוון את ההסתברות לאחד משני האלכסונים. זהו אפקט קוונטי מובהק - חלקיקים קלאסיים יציגו תמיד קורלציה סימטרית סביב שני הצירים.

ביותר, ולהפך. ראה את מפת ההסתברות באיור 4א. שני הפוטונים "בוחרים" להגיע לאותו צד. הפוטונים מקיימים סימטרייה הידועה במכניקת הקוונטים כסימטרייה של בוזונים (על שם סאטיינדרה בוזה, פיזיקאי הודי שפיתח את התחום עם איינשטיין יחד). אכן, בוזונים נוטים להתקבץ באותו אזור. אלקטרונים מקיימים סימטרייה הפוכה, של פרמיונים (נקראים על שם אנריקו פרמי, הפיזיקאי האיטלקי), שמונעת משני אלקטרונים להימצא באותו מצב. שני אלקטרונים היו דווקא נוטים להיפרד לאונות מנוגדות (ולא בשל מטענם החשמלי).

את שני הפוטונים ניתן לארגן במצבים קוונטיים מורכבים יותר. במיוחד מעניין המצב שבו נשלחים שני פוטונים יחד, שניהם דרך ליבה אחת או דרך שני צדדים. המצב ידוע כמצב קוונטי שזור: אין לנו מידע באיזו ליבה הם נמצאים, אך מידע על אחד מהם מיד משליך על השני. באיור 4ב אנו מראים תוצאות של ניסוי שביצענו בפוטונים שזורים. פוטונים שזורים מעניינים מאחר שהם מציגים תכונות קולקטיביות

◀ העולם הקלאסי, שבו כל חלקיק שומר על זהותו, תורת הקוונטים דורשת שכל שני חלקיקים שאינם ניתנים להבחנה זה מזה יהיו מוכללים לישות אחת. הבה נבחן איך אפקט זה משפיע על המערכת שלנו. נניח שוב סריג פוטוני מחזורי, אבל הפעם, במקום לשלוח מספר רב של פוטונים לאחת מליבות הסריג, נשגר בדיוק שני פוטונים, לשתי ליבות שכנות. חשוב ששני הפוטונים האלו יהיו זהים בכל תכונותיהם וישוגרו בדיוק באותו זמן, וכך כשיגיעו לצד השני של הדגם, לא נוכל להבחין, אפילו עקרונית, מי משניהם הגיע לגלאים שלנו. כאמור, ננסה ללמוד על הקורלציות ביניהם: אם גלינו פוטון אחד ביציאה מליבה מספר  $q$ , מה הסיכוי שנגלה את השני בליבה מספר  $r$ ? חשוב להדגיש שוב שהפוטונים אינם חשים זה בזה, אין ביניהם אינטראקציה, כלומר ההילוך הקוונטי של כל אחד מהם נעשה באופן עצמאי כמו שתואר למעלה. אבל כשנבחן את הקורלציה נגלה דבר מפתיע: אם מצאנו פוטון אחד הגיע לאונה הימנית, הסיכוי שהשני הגיע לאונה השמאלית קטן

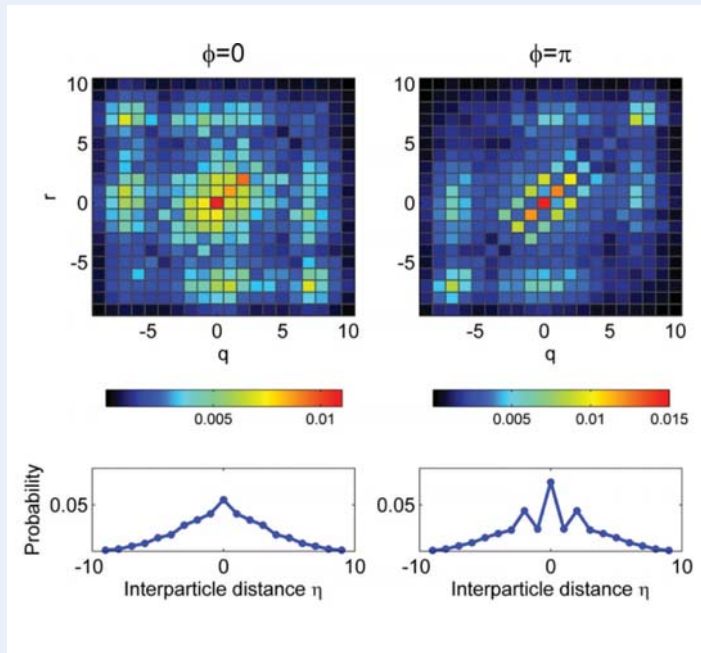


איור 5: פונקציית ההתפלגות המחושבת המתארת הילוך קוונטי בסריג מסודר (שמאל), בסריג לא מסודר (במרכז) ולאחר מיצוע על סריגים לא מסודרים רבים (ימין). הגרף הניסיוני מראה מדידה של ההתפלגות הממוצעת בסריגים פוטוניים שבהם המרחקים בין הליבות השתנו באקראי, כאשר אור נשלח בליבה המרכזית. ההתפלגות ממוקמת סביב למיקום ההתחלתי ומתאימה לתלות שחישב פיליפ אנדרסון ב־1958.

### אור וסדר

עד כה הנחנו שהסריג הפוטוני הוא סריג מחזורי מושלם וכל הליבות שלו זהות. אחד הפרקים החשובים של הפיזיקה של מוצקים בחצי השני של המאה העשרים עסק בשאלה איך אלקטרונים נעים בגביש שאינו מושלם ויש בו אי־סדר (מרדכי שגב, "אור ואי־סדר", איגרת, 34 [תשע"ג], עמ' 26). מתברר

מורכבות. כך למשל באמצעות שליטה בפאזה היחסית בין שתי הכניסות ניתן לשלוט בסימטרייה של הזוג ולגרום לפוטונים להתקבץ יחד, כמצופה מבוזזונים, או להיפרד, כאילו היו פרמיונים. כדי למדוד את הקורלציות הללו נשלחו זוגות רבים, ובאשר לכל אחד מהם נבדק לאילו ליבות הגיע. רק לאחר איסוף של מדגם מספיק היה ניתן לגזור את פונקציית ההתפלגות.



איור 6: קורלציה בין שני פוטונים שזורים המוזרקים לליבות שכנות בכניסה לסריג לא מסודר. הסימטרייה של המצב השזור משפיעה על מיקומם של הפוטונים, אפילו בנוכחות אי־סדר וגם לאחר מיצוע סטטיסטי. שתי הדיאגרמות העליונות מציגות את הקורלציות שנמדדו בשני המצבים, בעלי סימטרייה בזווית (שמאל) ופרמיונית (מימין). בהשוואה לסריגים מחזוריים (איור 4) רואים צבר גדול של פוטונים שנשארו ממוקמים סביב נקודת ההתחלה שבמרכז. תבנית המשבצות במפה הימנית רומזת על תלות לא טריוויאלית של מיקומו של פוטון אחד במיקומו של השני. הגרפים התחתונים מתארים את התפלגות המרחקים בין שני הפוטונים ביציאה. במפתיע, החלקיקים השזורים בעלי סימטרייה פרמיונית מעדיפים להימצא במרחקים זוגיים זה מזה.



השזור. בולטת במיוחד המפה הימנית, שמאופיינת בתבנית משבצות. התבנית הזאת נובעת מנטייתם של הפוטונים במקרה הזה להתמקם במרחקים זוגיים זה מזה – ואכן כשמנתחים את המרחק הצפוי בין החלקיקים שעברו לוקליזציה, מתגלה התנודה לא צפויה המתוארת באיור.

## סיכום

היכולת הניסויית לעבוד עם פוטונים בודדים, לייצר אותם במצבים שונים ולחקור את התקדמותם במבנים שאותם אנחנו מייצרים בדייקנות רבה מאפשרת לנו להדגים ולחקור עקרונות קוונטיים בסיסיים – שאת חלקם סקרנו במאמר זה. חלק מהתהליכים האלה צפוי וידוע, והם קיימים בבסיסה של הבנת תהליכים אלקטרוניים במוצקים, אך מעולם לא נצפו ישירות במעבדה. חלקם האחר לא היה ידוע, שכן הם לא היו ניתנים לחקירה במערכות אלקטרוניות. ראינו כאן עושר של תופעות המערבות שני חלקיקים קוונטיים בלבד. אחת התקוות היא שבאמצעות הוספה זהירה ומושכלת של עוד חלקיקים נוכל ללמוד על מערכות קוונטיות מורכבות יותר ויותר, שאת חלקן איננו מבינים כיום.

אולם ליכולת הניסויית הזאת יש גם השלכות נוספות, שאמנם לא התעכבנו עליהן כאן אך הן מעוררות עניין רב בעת האחרונה: התקדמותו של התחום הידוע כמחשוב קוונטי תלויה בפיתוחן של יכולות כאלו. רבים מאמינים שמחשוב קוונטי עשוי להביא למהפכת המידע הבאה, שכן מחשבים שיושתתו על עקרונות אלו יהיו משוחררים מרבות מן המגבלות של המחשבים בני זמננו המושתתים על העקרונות הקלאסיים. אחרים ספקניים יותר, שכן מכשלות רבות, חלקן לאו דווקא טכניות, עומדות בדרך לבניית מחשבים קוונטיים. אבל כולם מסכימים שחקירת התחום והבנת המערכות האלה ומגבלותיהן ילמדו אותנו הרבה על העולם שבו אנו חיים. ■

◀ שאי-סדר יכול להשפיע השפעה קיצונית על תנועתם של האלקטרונים ולגרום להם להישאר ממוקמים בסביבת נקודת המוצא שלהם. איור 5 מראה את ההילוך הקוונטי הצפוי בסריג מושלם, בסריג שבו אי-סדר, ולבסוף לאחר מיצוע על סריגים לא מסודרים רבים. פונקציית ההתפלגות הממוצעת אינה מתרחבת, והאלקטרונים נשארים ממוקמים בסביבת נקודת ההתחלה. את האפקט הזה, שידוע כ"לוקליזציית אנדרסון", על שם המדען שחזה אותו לפני יותר מחמישים שנה, ניתן למדוד ישירות באמצעות שימוש בסריגים פוטוניים, ותוצאה של מדידה כזאת מוצגת גם היא באיור 5.

גם התנהגותם של חלקיקים קוונטיים בסריגים לא מסודרים, המוליכה ללוקליזציה של אנדרסון, היא במהותה אפקט של גלים, ומוסברת בהתאבכותם. ואכן הניסוי שמוצג באיור 5 גם הוא בוצע באור לייזר "קלאסי". שוב ראוי לשאול את השאלה אם התקדמות של אור בסריגים לא מסודרים תהיה שונה בגבול הקוונטי, שבו מתקדמים פוטונים בודדים. כמו בסריג המסודר, גם כאן השוני בין אור קלאסי לקוונטי יתגלה רק כשנחקור את הקורלציות בין הפוטונים. אבל כדי לגלות את האפקט הקוונטי בסריגים לא מסודרים עלינו למצע על סריגים רבים בעלי אי-סדר שונה. בסריג המסודר ראינו שחלקיקים מציגים קורלציות לא טריוויאליות, לפי הסימטריה שלהם. האם הקורלציות הקוונטיות שורדות גם בנוכחותו של אי-סדר? האם הסימטריה משפיעה על קורלציות גם בסריג לא מסודר?

התשובות לשאלות אלה נענו רק לאחרונה, כשהצלחנו לשגר זוגות של פוטונים שזורים ולמדוד את הקורלציות ביניהם תוך מיצוע על הסטטיסטיקה של אי-הסדר. אחד הממצאים המפתיעים הוא עד כמה נשמרת הקורלציה הקוונטית גם בנוכחות אי-סדר, ואפילו אחרי מיצוע על דגימות רבות של אי-סדר. מפות הקורלציה המוצגות באיור 6 מראות עד כמה משתנה הקורלציה כתלות בסימטריה של הזוג