

הקסמים של נוזלי-העל מנצחים את כוח המשיכה

Michael Kosterlitz*

המחלקה לפיזיקה, אוניברסיטת בראון, פרובידנס, רוד איילנד, ארצות הברית

סוקרים צעירים

RANJAI

גיל: 13



RANVIR

גיל: 13



YARDEN

גיל: 14

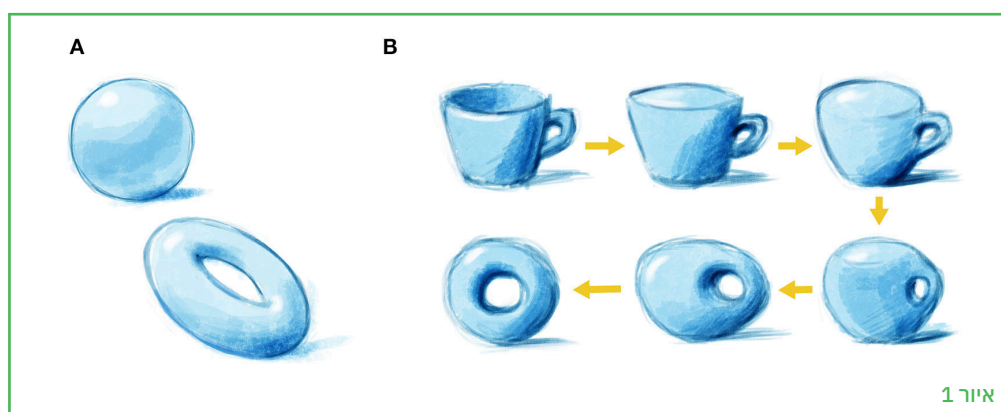


פיזיקה היא אחד הכלים הטובים ביותר העומדים לרשותנו לפתרון החידות הקיימות בעולם, החל מעיסוק בתופעות נפוצות שאתם רואים סביבכם, כמו משב הרוח בענפי העצים, ועד לשאלות על תופעות נדירות ומסתוריות שמתרחשות רק בתנאים מסוימים. המסע שלי בתחום הפיזיקה הוביל אותי לבחון תופעה מיוחדת מאוד, שבה נוזל רגיל מתקרר ופתאום מְשָׁנָה את תכונותיו הבסיסיות והופך למה שאנו קוראים לו: נוזל-על. במאמר זה תתלוו אליי למסע בעולם המרתק של נוזלי-העל, אספר לכם על כמה מהדברים המעניינים שקשורים בהם, ואסביר לכם מה הקשר ביניהם לבין התגלית שהובילה אותי לזכייה בפרס נובל לפיזיקה בשנת 2016.

פרופסור מייקל קוסטרליץ (Michael Kosterlitz) זכה בפרס נובל לפיזיקה בשנת 2016 עם פרופסור דיוויד ת'אולס (David Thouless) ופרופסור דאנקן הולד'יין (Duncan Haldane), על תגליות תיאורטיות של מעבְּרֵי מופע (פְּזָה) טופולוגיים ומופעים טופולוגיים של חומרים.

טופולוגיה: שפה מתמטית של צורות

טופולוגיה היא תחום במתמטיקה העוסק בצורות של עצמים ומחלק אותם לקבוצות לפי צורתיהם. אחד המאפיינים המרכזיים של כל צורה הוא מספר החורים שיש בה. כך, למשל, לכדור אין חורים, ואילו בדונאט יש חור אחד (איור 1A). לכן, הכדור והדונאט שייכים לשתי קבוצות טופולוגיות נפרדות. זה אומר שאי אפשר להפוך כדור לדונאט בקלות, כי לשם כך ניאלץ לחורר את הכדור ובעקבות כך לקרוע את החומר. בטופולוגיה אפשר לעוות את החומר כמה שרוצים, אבל אין לחורר אותו או להדביק חלקים זה לזה. כך אפשר, למשל, לשנות את צורתו של כדור לכדי צורה של קערת מרק, והם יהיו זהים מבחינה טופולוגית. אף על פי שהרעיונות האלה נראים מוזרים מאוד, הם יכולים להיות שימושיים.



איור 1

מה דעתכם על הצורות של דונאט ועל ספל קפה שיש לו ידית? הם עשויים להיראות שונים בהתחלה, אבל אם תבחנו אותם מקרוב, תגלו שלשניהם יש חור אחד. לכן הדונאט וספל הקפה שווים ערך אחד לשני מבחינה טופולוגית. המונח הטכני לתיאור השוויון הזה הוא "שקילות טופולוגית", כלומר אפשר להפוך אחד לשני בצורה חלקה ומתמשכת (איור 1B). מספר החורים אינו משתנה, ונקרא "נְשִׁמּוּרָה טופולוגית" (invariant topology). המשמעות היא שגם כאשר העצמים הללו עוברים מניפולציה שמשנה את המראה החיצוני שלהם, הטופולוגיה שלהם אינה משתנה.

שפת הטופולוגיה יכולה להיות שימושית כשרוצים לתאר את תכונותיהם של חומרים מסוימים, אשר מכונים **חומרים טופולוגיים**. בחלק הבא נציץ אל עולם הטופולוגיה, ונראה איך היא עוזרת לנו לזהות את ההבדלים בין חומרים, ולהסביר תופעות חריגות ומלהיבות, כמו נוזלים שנראים כאילו הם מתנגדים לכוח המשיכה.

חומרים טופולוגיים: מהרגיל לאקזוטי

כפי שצינו, טופולוגיה היא דרך נוחה לתאר הבדלים מסוימים שאנו רואים בין חומרים. אחת ממשפחות החומרים שכולנו מכירים היטב נקראת **מְבוּדְדִים**. מְבוּדְדִים הוא חומר, כגון גומי או פלסטיק, שאינו מוליך חשמל בקלות. תכונה זו נקבעת על ידי מאפייני האנרגיה של החומר, כלומר על פי רמות האנרגיה שנוצרות על ידי האלקטרונים הנמצאים באותו החומר. בדרך כלל חומרים שונים מאופיינים על ידי רמות אנרגיה שבהן נמצאים האלקטרונים. בחומרים מְבוּדְדִים קיים "פער אנרגיה" בין שתי רמות אנרגיה, ובדרך כלל האלקטרונים אינם יכולים

טופולוגיה (Topology)

ענף במתמטיקה העוסק בתיאור צורות של עצמים.

איור 1

טופולוגיה וצורות (A) לכדור אין חורים, ולדונאט יש חור אחד – לכן הם שייכים לשתי קבוצות טופולוגיות נפרדות. (B) גם לדונאט וגם לספל הקפה יש חור אחד, ולכן הם שני ערך מבחינה טופולוגית. לכן נוכל להפוך את האחד לשני בצורה חלקה בלי לעשות אף אחת משתי הפעולות האסורות בטופולוגיה: אין לקרוע את החומר ואין לסגור את החור. הרעיונות הטופולוגיים עשויים להיות שימושיים בפיזיקה.

חומרים טופולוגיים (Topological Materials)

חומרים שתכונותיהם מתוארים באמצעות טופולוגיה.

להתגבר על הפער הזה ולכן תנועתם מוגבלת. בחומרים מוליכים אין פער אנרגיה, ולכן האלקטרונים חופשיים לנוע בין רמות אנרגיה בתוך החומר (למידע נוסף על רצועות אנרגיה של מבודדים ומוליכים, ראו כאן). אפשר להגדיר את משטח האנרגיה הפוטנציאלית של מערכת מבודדת לפי שמורות טופולוגיות, כלומר התכונות הטופולוגיות נשמרות גם כאשר המערכת משנה את מצבה. זה אומר שאנו יכולים לזהות ולסגן מבודדים מסוימים על סמך התכונות הטופולוגיות של מצבי האנרגיה שלהם.

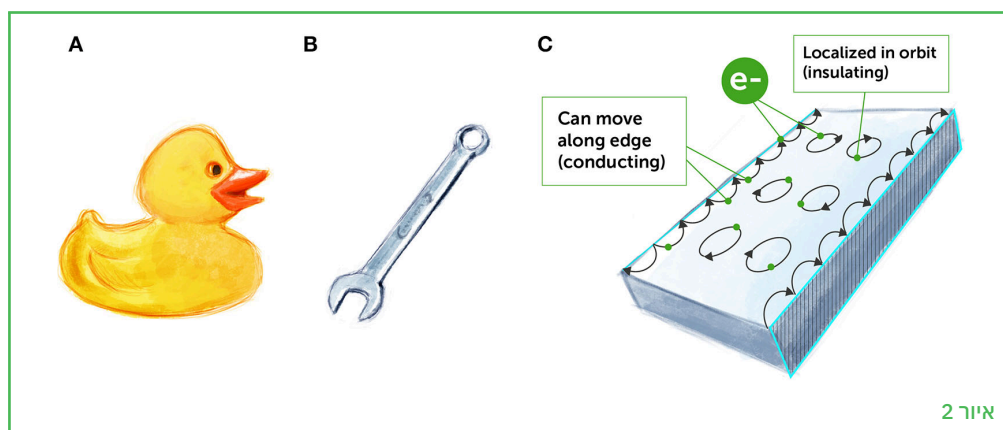
קיימת קבוצה מסוימת של חומרים מבודדים שמשכה עניין רב בחמש-עשרה השנים האחרונות. חומרים אלו נקראים **מבודדים טופולוגיים** [1], כיוון שאפשר לסווג אותם ולתאר אותם באמצעות שמורות טופולוגיות. מבודדים טופולוגיים הם מיוחדים, משום שהם גם מוליכים וגם מבודדים בו זמנית. איך זה ייתכן? בחלק האמצעי של החומרים הללו, הנקרא פנים החומר, האלקטרונים אינם נעים בחופשיות, אלא במעגלים קטנים וצפופים (איור 2C). לכן, פנים החומר של החומרים הטופולוגיים הוא מבודד, בדומה לפלסטיק או לגומי (איור 2A). בניגוד לכך, על פני השטח של חומרים אלה נוצרים מצבים מיוחדים שבהם אלקטרונים יכולים לנוע לאורך הקצה של החומר (איור 2C). כלומר פני השטח של המבודדים הטופולוגיים מוליכים כמו מתכות (איור 2B). אולי אתם חושבים לעצמכם, "יופי, זה מגניב, אבל האם זה בכלל שימושי?" זאת שאלה שמעסיקה כיום פיזיקאים ומהנדסים מחשבים רבים. הבה נציץ באחת התשובות האפשריות.

מבודדים טופולוגיים (Topological Insulators)

חומרים בעלי תכונות של מבודדים במרכזם ותכונות של מוליכים על פני השטח שלהם.

איור 2

מבודדים ומוליכים. (A) גומי הוא מבודד חשמלי, ולכן אינו מוליך חשמל בקלות. **(B)** מתכות מוליכות חשמל, כלומר החשמל זורם דרכן בקלות. **(C)** מבודדים טופולוגיים הם חומרים ייחודיים מבחינת תכונות ההולכה שלהם: במרכז, הנקרא פנים החומר, האלקטרונים נעים במעגלים סגורים ("מוגבלים למקומם") והם מתנהגים כמו מבודדים. אך על פני השטח של מבודדים טופולוגיים, האלקטרונים נעים בחופשיות והם פועלים כמו מוליכים ("מקפצים" על הקצוות).
Conducting = מוליך;
Insulating = מבודד;
Localized in orbit (insulating) = ממוקם במעגל (מבודד)
Can move along edge (conducting) = יכול לנוע לאורך הקצה (מוליך).



האם מבודדים טופולוגיים הם שימושיים?

מתברר שהמצבים המוליכים הנוצרים על פני השטח של מבודדים טופולוגיים יציבים מאוד – הם עמידים בפני פגמים והפרעות המתרחשות בחומר. אחת הסיבה המרכזיות לכך שמצבים אלה הם עמידים ויציבים היא שהמאפיינים שלהם נסמכים על המערכת כולה – לא רק בחלק קטן ממנה או בכמה אטומים במיקום מסוים. זאת תופעה המשותפת לחומר בכללותו, וגם אם קיים פגם מקומי בחומר, אין לו השפעה מהותית על המערכת כולה, ולכן הוא אינו משנה את המצב הטופולוגי שלה [2].

כיצד נוכל להשתמש בתכונה הזאת? אפשר לרתום את חוסנם של המבודדים הטופולוגיים עבור יישומים בתחום המחשבים, כיוון שהם מספקים יציבות. יציבות היא הדרישה הבסיסית ביותר של רכיבי המחשב (רכיבים במחשב שמבצעים חישובים). הסיבה היא שחשוב לנו

שהרכיבים הללו יספקו תוצאות שיהיו עקביות ככל האפשר, ועם כמה שפחות שגיאות. בזכות תכונות אלו, למבדדים הטופולוגיים יש פוטנציאל עצום לשיפור רכיבי המכשור בעתיד. עם זאת, ישנם אתגרים טכניים גדולים המעורבים בתהליך שכזה, כך שאנחנו רחוקים למדי משימוש במבדדים טופולוגיים במחשבים, אך אולי זה יהיה אפשרי בעתיד.

כעת נצלול לתוך עולמם הקסום של החומרים הטופולוגיים. בחלק הבא אציג בפניכם את תרומתי להסבר של אחת התופעות האקזוטיות ביותר בפיזיקה הנקראת נזילות-על.

נוזל מעופף: סיפורו של הליום הקר

האם ידעתם שיש נוזלים שיכולים לקרוא תיגר על כוח המשיכה ולטפס על קירות זכוכית? נוזלים אלו נקראים **נוזלי-על**, ובטמפרטורות נמוכות מאוד הם מתנהגים בצורה מוזרה ביותר (הטמפרטורה שבה הליום רגיל הופך לנוזל-על נקראת טמפרטורת המעבר למגדדה, שהיא 2.17°K בלחץ של אטמוספירה אחת). בשל אופיים האקזוטי, המדענים מגלים עניין רב בנוזלי-העל, המאפשרים לנו לחקור תופעות פיזיקליות יוצאות דופן שאיננו נתקלים בהן בחיי היום-יום. הדוגמה הנפוצה ביותר לנוזל-על היא **הליום נוזלי** – ^4He אתם ודאי מכירים את הליום בתור גז למילוי בלונים שגורם לקול להישמע מצחיק כששואפים אותו, אבל הוא יכול להתקיים גם כנוזל, בטמפרטורות נמוכות במיוחד, הקרובות לאפס המוחלט (0°K שהן מינוס 273 מעלות צלזיוס).

בשנת 1972 שלושה פיזיקאים פרסמו ניסוי מבריק שבו נערכו תצפיות בשכבות דקות של הליום (Helium) [3]. הם לקחו גביש קוורץ ושמו אותו באטמוספירה של גז הליום. הם התאימו את הלחץ של הגז, כך שהכמות הכוללת של הליום שנקשר לפני השטח של גביש הקוורץ השתנתה, ונוצרה על גביו שכבה בעובי של שניים או שלושה אטומים. התדר של קרט התהודה הטבעי של גביש הקוורץ תלוי במסה הכוללת של הגביש הרוטט. כאשר שכבה דקה של אטומי הליום נדבקה לפני הגביש, הציפייה הטבעית היא שהאטומים הללו ינועו עם פני הגביש כך שהשפעתם היחידה תהיה הגדלת מסת הגוף הרוטט ולהקטין מעט את תדירות התהודה שלו. כשהפיזיקאים מדדו את תדירות התנועה של הגביש המכוסה הליום בלחץ נמוך ובכיסוי מצומצם מאוד, הם ראו את הירידה שציפו לראות בתדר התהודה. עם זאת, כאשר לחץ הגז וכיסוי ההליום גברו, תדר התהודה כבר לא ירד כפי שחשבו (**איור 3A**) – הערך שלו היה שונה מהצפוי, כאילו ההליום שהתווסף התנתק מתנועת הגביש.

בניסוי שהתקיים לאחר מכן [4] המדענים כרכו יריעת פלסטיק סביב מוט מתנד העשוי קוורץ (**איור 3B**). כאשר יוצרים קרט בקוורץ שהוא דמוי-גביש, הוא נע בתדירות מסוימת, הנקראת **תדירות התנועה**. בהתחלה הפיזיקאים מדדו את תדירות התנועה הטבעית של המוט שגליל הפלסטיק כרוך סביבו. לאחר מכן, הם הגבירו את הלחץ של גז ההליום המקיף את המוט המתנווד, ומדדו שוב את תדירות התנועה של מוט הקוורץ. כאשר אטומי ההליום פוגשים את פני הפלסטיק הסופח, הם בדרך כלל נספחים בו (כלומר נקשרים אליו) ויוצרים מעטה דק מסביב למוט ומגדילים את המסה שלו. כתוצאה מכך, תדר התנועה הטבעי פוחת מעט, כיוון שגבישים כבדים יותר מתנוודים בתדר נמוך יותר (זזים לאט יותר) מאשר גבישים קלים.

נוזלי-על (Superfluids)

נוזלים שזורמים
ללא דיסיפציה.

תדירות התנועה (Oscillation Frequency)

התדירות שבה מתנד רוטט.

איור 3

ניסוי הליום במצב נוזל-על.

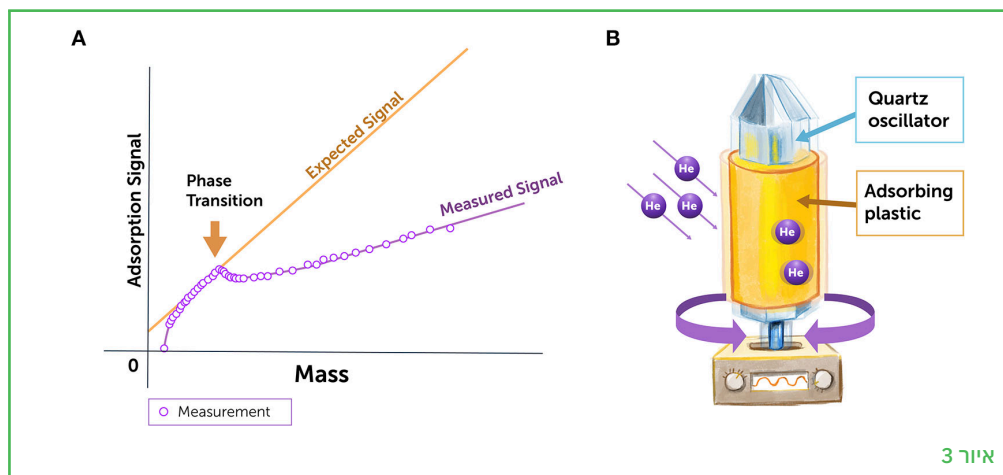
(A) כאשר נספחו לפני השטח של הגביש כמה שכבות דקות של הליום קר, תדירות התנודה של גביש הקוורץ שנמדדה הייתה שונה מתדירות התנודה שציפנו לה. אות הספיחה (adsorption signal) מייצג את תדירות התנודה, והמסה מייצגת את כמות הליום שנספח על פני הגביש. הליום במצבו הרגיל מגדיל את המסה המתנודדת, ומקטין את תדירות התנודה שלה. אם חלק מההליום הופך לנוזל-על, הוא אינו מגדיל את המסה של המתנד באותו האופן, ולכן תדירות התנודה היא פחותה מזאת של הליום הרגיל (האיור נלקח מ-[3]). (B) בניסוי שנערך לאחר מכן [4], שְׁקָל תנודות בתדירות נמוכה בהרבה, כרכו יריעת מיילר (Mylar) עשויה מפלסטיק סביב מוט מתנד קוורץ שמסתובב הלך ושוב. במקרה הזה גז ה- ^4He נספח על יריעת הפלסטיק, והמדענים מדדו את תדר התהודה ואת הדיספיציה. העיקרון של ניסוי זה היה זהה, אך התוצאות שהתקבלו היו הרבה יותר מדויקות ומפורטות.

= Adsorption signal
אות הספיחה;
= Mass
מסה;
= Phase Transition
מַעְבָּר בין מצבים;
= Expected Signal
האות המצופה;
= Measured Signal
האות שנמדד;
= Quartz oscillator
מתנד קוורץ;
= Adsorbing plastic
פלסטיק סופח;
= Measurement
מדידה.

דיספיציה

(Dissipation)

אובדן אנרגיה שאי אפשר להחזיר ללא הוספה של אנרגיה חיצונית.



איור 3

המשמעות של תוצאה זו היא שחלק ממעטה הליום כבר לא היה קשור למתנד ברגע שהוא הפך לנוזל-על. ההבדל בין הליום רגיל להליום במצב נוזל-על טמון באופן שבו הם זורמים. הליום רגיל נקשר לכל דבר שהוא זורם עליו בשל תכונה הנקראת דיספיציה. לעומת זאת, הליום במצב נוזל-על זורם בחופשיות, ולכן נראה שהוא "עף" או מרחף מעל החומר שעליו הוא זורם! אתם יכולים לצפות בכמה הדגמות מעניינות שבהן משתמשים בהליום במצב נוזל-על כאן וכאן.

היה זה ניסוי פורץ דרך שהראה ששכבות דקות של הליום הופכות לנוזלי-על בטמפרטורות נמוכות. הבעיה הייתה שבאותה התקופה לא הייתה תיאוריה שהסבירה את השינוי הזה, שנקרא **מעבר מופע (פְּזָה)** במעבר מהליום רגיל להליום במצב נוזל-על. אחת התיאוריות הנפוצות באותה התקופה אפילו גרסה כי מעבר מופע שכזה אינו אמור להתרחש בתנאים אלו, וכי נזילות-על היא בלתי אפשרית בשכבה דו-ממדית. למעשה, הניסוי הזה סתר את הדרך שבה תפסו בזמנו את אופיין של כל המערכות במצב של טמפרטורה נמוכה. הייתה אז טענה מתמטית שקבעה שבשלב של טמפרטורה נמוכה של מערכת כלשהי, סדר ארוך-טווח אינו יכול להתקיים בשום טמפרטורה. כלומר לפי הדעה המקובלת, פירושו שנזילות-על אינה יכולה להתקיים בשכבה דו-ממדית כמו זו שקיימת בניסוי שראינו. לאור תוצאות הניסוי, נוצרה סתירה מהותית בין התיאוריה המתמטית, לפיה נראה שנזילות-על אינה אפשרית בשכבה דקה, ובין תוצאות התצפיות הניסיוניות, שהצביעו על ההיפך הגמור. היה ברור שהייתה טעות או פירוש לא נכון בניסוי או בתיאוריה, כיוון שהניסוי הראה באופן שאינו משתמע לשתי פנים ששכבה דקה של ^4He היא נוזל-על, ושמתקיים בה מעבר בין מופעים. או אז, המנחה שלי דאז פרופ' דיוויד ת'אולס (David Thouless) ואנוכי פיתחנו תיאוריה חדשה שמסבירה את המעבר בין המופעים של שכבות הליום דקות מנוזל-על לנוזל רגיל, וכך פתרנו את הסתירה בין הניסוי לבין התיאוריה שהייתה ידועה עד כה.

מערבולות: "מאחורי הקלעים" של הליום במופע של נוזל-על

כפי שצינתי, להליום נוזלי יש שני מופעים. במופע הרגיל שלו, כשההליום זורם מתרחשת דיספיציה, כלומר נוצר מגע בינו לבין המשטח שעליו הוא זורם, ואז נוצרים חילופי אנרגיה עם אותו המשטח, וההליום נדבק אליו. כשההליום הוא במופע של נוזל-העל שלו, ההליום

מעבר מופע (פְּזָה) (מעבר בין מצבי צבירה) (Phase Transition)

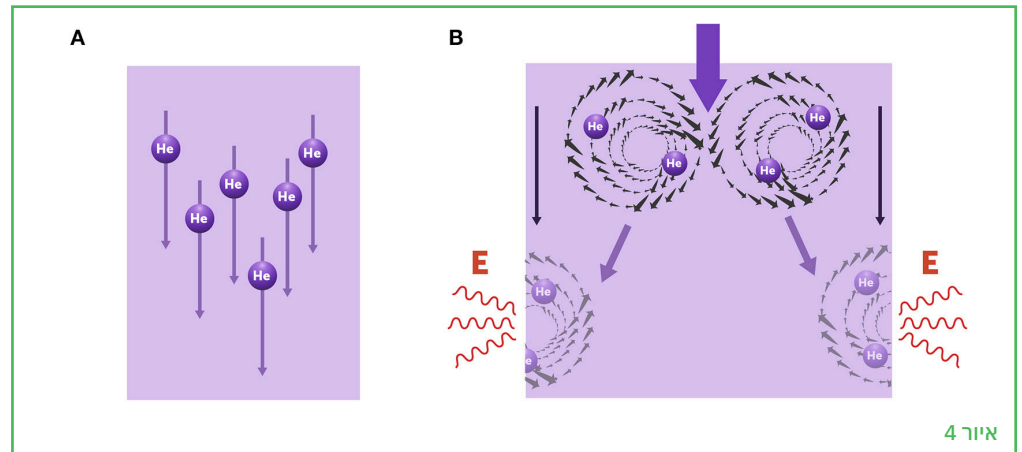
מעבר פתאומי בין שני מצבים של מערכת שבהם מאפייני המערכת משתנים. למשל, מעבר של מים ממצב צבירה נוזלי למצב צבירה מוצק – קרח.

הנוזלי זורם בחופשיות ללא דיסיפציה, ומתנהג כאילו הוא מרחף מעל פני השטח שהוא בא איתו במגע. כדי להבין את מעבר המופעים בין הליום רגיל לבין נוזל-העל שלו, פרופ' ת'אוֹלֵס ואני נדרשנו להבין את המנגנון האחראי לדיסיפציה. מתברר שהתשובה טמונה בתצורות יוצאות-דופן הנקראות מערבולות (איור 4). מסיבות של מכניקה קוונטית, המערבולות במצב של עירור (העלאת הליום הנוזלי לרמת אנרגיה גבוהה יותר) הן הגורם היחיד שמסוגל ליצור דיסיפציה בזרימת נוזל-העל.

תופעה זו מסבירה גם מדוע ליריעת הפלסטיק ה"מבולגנת" שעליה זורם הליום, אין השפעה על התיאוריה או על הניסוי. ההשפעה היחידה של היריעה היא על החיכוך בינה לבין המערבולות, אך אין לה השפעה על נוזל-העל. כדי להבין את הדברים בצורה פשוטה יותר, אתם יכולים לדמיין את המערבולות כנוזלים המסתחררים סביב, כפי שקורה כששולפים את הפקק באמבטיה מלאת מים, והם מתנקזים ממנה בסחרור. כדי להבין זאת תצטרכו ללמוד פיזיקה לעומק, אז כרגע אתם יכולים פשוט לזכור שהמערבולות הללו בנוזל-העל הן הגורמים המעוררים היחידים שאנחנו צריכים להכיר. עלינו לדעת שבדו-ממד המערבולות הללו מקיימות אינטראקציה זו עם זו בדיוק כמו חלקיקים קטנים טעונים חשמלית שיכולים להופיע ולהיעלם באקראי, אבל לבסוף המטען החשמלי הכולל של המערכת נשאר אפס. בטמפרטורות נמוכות מאוד המערבולות הללו יוצרות זוגות ניטרליים, כלומר הן מנטרלות אחת את השנייה: אחת המערבולות מסתובבת נגד כיוון השעון, והשנייה מסתובבת עם כיוון השעון. בטמפרטורות גבוהות יותר הזוגות מתפרקים, ומתקבלות שתי מערבולות נפרדות שנסחפות לשולי הנוזל ונעלמות שם, וכך הן מפחיתות במעט את הזרימה האחידה של נוזל-העל (איור 4B). למעשה, זוהי דיסיפציה הנצפית בזרימת הנוזל הרגיל. כיוון שאפשר להגדיר את שני המצבים של זרימת הליום הנוזלי כשני מצבים טופולוגיים, ההליום הנוזלי נחשב גם הוא לחומר טופולוגי – בדומה למבונדדים הטופולוגיים שדנו בהם קודם לכן (למידע נוסף על חומרים טופולוגיים ומערבולות, ראו כאן).

איור 4

מנגנון מעבר המופע בהליום נוזלי. (A) כיוון שבהליום שבמצב של נוזל-על אין מערבולות, הנוזל זורם בחופשיות ללא דיסיפציה. (B) בהליום רגיל נוצרים זוגות של מערבולות הנסחפות לשוליים מנוגדים של הנוזל (בחלק העליון של האיור). שם הן נעלמות ומשחררות אנרגיה (בחלק התחתון של האיור). בתהליך זה מתרחשת דיסיפציה והתוצאה היא זרימה איטית יותר ודיסיפציה מוגברת. He = הליום (Helium); E = אנרגיה (Energy).



לאחר שגילינו שהפיזיקה החיונית של מערכת נוזל-העל כרוכה בהשפעה ההדדית של מערבולות, פיתחנו מודל מתמטי המיועד להסביר בדיוק גבוה מאוד את מעבר המופעים של ההליום הנוזלי, וכן מעברי מופעים במערכות דומות [4–7]. הייתה זאת התפתחות חשובה שקידמה אותנו מאוד בהבנת כמה מהמאפיינים המדהימים של החומרים הטופולוגיים.

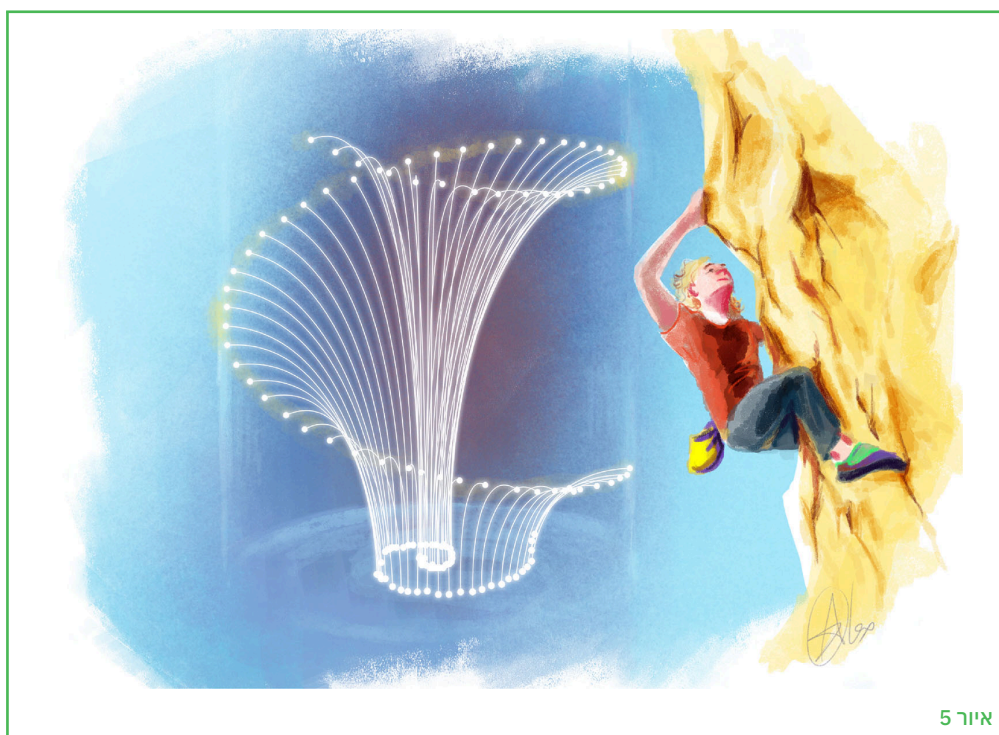
ברצוני לסיים בכמה הערות אישיות לקוראים הצעירים על אהבתי למתמטיקה ולפיזיקה ובהמלצות שלי לחיים מאושרים.

המלצות למוחות צעירים סמלים נפלאים: היופי שבמתמטיקה ובפיזיקה

כשהתוודעתי לאלגברה בבית הספר חשבתי לעצמי, "איזה יופי! זו דרך הרבה יותר טובה מְקִשְׁבֹן לפתור בעיות!", מפני שהאלגברה אפשרה לי לעשות הרבה פעולות מתמטיות שקודם לכן לא יכולתי לעשות בקלות. הרגשתי כאילו מישהו הדליק את האור ואִפשר לי פתאום לראות טוב יותר, והצלחתי לעשות דברים שלא יכולתי קודם! מייד התאהבתי בסמלים, ובעובדה שהסמלים המתמטיים חסכו הרבה בלבול ופישטו מאוד את הדברים. אני יודע שלא כולם חשים כך, כי זה תלוי בדרך שבה המוח של כל אחד מאיתנו עובד, אבל עבורי העבודה עם סמלים ומשוואות היא מהנה ומרגשת עד היום. במובן מסוים, העיסוק בפיזיקה דומה לטיפוס הרים (שהיא עוד אחת מתשוקותיי) – במצב כזה אתם נמצאים לבדכם במקום לא-נודע, יש לכם אחריות מלאה על הפעולות שלכם, ואתם מנסים לנווט את דרככם כדי להתקדם (איור 5). היתרון בפיזיקה הוא שה"עונש" על טעות הוא פחות חמור מאשר בטיפוס הרים!

איור 5

המלצות למוחות צעירים.
העבודה עם סמלים ועם משוואות דומה לטיפוס הרים: אנחנו אחראים לגמרי לפעולותינו וחוקרים את הלא-נודע, בעוד שאנו מנסים למצוא את דרכנו. בעיניי זה מלהיב מאוד.



איור 5

איך לבחור מקצוע

כדאי לכם לעשות את הדברים שאתם אוהבים ושאתם טובים בהם. חשוב להיות טובים בְּמָה שאתם עושים, כי אם אתם טובים במשהו, כנראה שתיהנו מהעשייה שלכם! לדעתי חשוב גם ליהנות ממה שעושים, כי אם לא תיהנו מהעבודה שלכם – לא שווה לעשות אותה. אז

זאת העצה שאני מציע לקוראים הצעירים: תיהנו מהחיים שלכם, כי חיים רק פעם אחת, ואם לא נהנים – אז מה שווים החיים?

תודות

ברצוני להודות לנועה שגב על עריכת הריאיון שהיווה את הבסיס למאמר זה, ועל כתיבה משותפת של המאמר. תודה לאלכס ברנשטיין עבור האיורים, ולסוזן דיבד (Susan Debad) על העריכה של כתב היד. תודה לד"ר סברמניאן רמצינדרן (Subramanian Ramachandran) על הערותיו החשובות על כתב היד.

מקורות

1. Moore, J. E. 2010. The birth of topological insulators. *Nature*. 464:194–8. doi: 10.1038/nature08916
2. Qi, X. L. and Zhang, S. C. 2010. The quantum spin hall effect and topological insulators. *arXiv preprint*. arXiv:1001.1602. doi: 10.1063/1.3293411
3. Chester, M., Yang, L. C., and Stephens, J. B. 1972. Quartz microbalance studies of an adsorbed helium film. *Phys. Rev. Lett.* 29:211. doi: 10.1103/PhysRevLett.29.211
4. Bishop, D. J., and Reppy, J. D. 1978. Study of superfluid transition in 2-dimensional ^4He films. *Phys. Rev. Lett.* 40:1727. doi: 10.1103/PhysRevLett.40.1727
5. Kosterlitz, J. M., and Thouless, D. J. 1973. Ordering, metastability and phase transitions in two-dimensional systems. *J. Phys. C Solid State Phys.* 6:1181. doi: 10.1088/0022-3719/6/7/010
6. Kosterlitz, J. M. 2016. Kosterlitz–Thouless physics: a review of key issues. *Rep. Prog. Phys.* 79:026001. doi: 10.1088/0034-4885/79/2/026001
7. Hadzibabic, Z., Krüger, P., Cheneau, M., Battelier, B., and Dalibard, J. 2006. Berezinskii–Kosterlitz–Thouless crossover in a trapped atomic gas. *Nature*. 441:1118–21. doi: 10.1038/nature04851

פורסם אונליין: 19 בספטמבר 2024

נערך על ידי: Joey Key

מנחים מדעיים: Ilan Be'Ery | Varsha Singh

ציטוט: Kosterlitz M (2024) הקסמים של נוזלי-העל מנצחים את כוח המשיכה. *Front. Young Minds*. doi: 10.3389/frym.2022.1039653-he

תורגם והותאם מ: Kosterlitz M (2023) Defying Gravity? On the Magic Tricks of Superfluids. *Front. Young Minds* 10:1039653. doi: 10.3389/frym.2022.1039653

הצהרת ניגוד אינטרסים: המחברים מצהירים כל המחקר נערך בהעדר כי קשר מסחרי או פיננסי שיכול להתפרש כניגוד אינטרסים פוטנציאלי.

זכויות יוצרים © 2022 © 2024 Kosterlitz. זהו מאמר בגישה פתוחה שמופץ תחת תנאי רישיון **Creative Commons Attribution License (CC BY)**. השימוש, ההפצה או ההעתקה מותרים לשימוש בפורומים אחרים ובלבד שיינתן קרדיט למחברים המקוריים ולבעל זכויות היוצרים, ושהפרסום המקורי בעיתון זה מצוטט בהתאם למקובל באקדמיה. השימוש, ההפצה או ההעתקה אינם מותרים אם הם אינם עומדים בתנאים אלה.

סוקרים צעירים

גיל: 13, RANJAI

קוראים לי רַנְג'אי ואני מתעניין מאוד בכימיה ובאסטרונומיה. בזמני הפנוי אני קורא ספרים ושומע שירים (כמעט כל הזמן!). המקצועות האהובים עליי הם מתמטיקה ומדעים. אני משחק טניס, טניס שולחן, ולפעמים קריקט וכדורגל. אני גם צופה בסדרה "נָארוטו" בטלוויזיה.

גיל: 13, RANVIR

שמי רנביר ואני בכיתה ח'. אני מתעניין בהרפוטולוגיה (חקר הזוחלים) ואוהב ללמוד על זוחלים, ובמיוחד על נחשים. כשהייתי צעיר יותר, תפסתי חומטים וגיליתי שהם מרתקים. אני אוהב לצאת לטיולים עם החברים שלי כדי למצוא חרקים ותולעים. אפילו מצאנו צפרדע צרת-פה ונחש מזן *Lycodon capucinus*! מלבד הרפוטולוגיה, אני אוהב לעסוק באוריגמי אבל לא מודולרי. בימים אלו אני גם קורא מסיפורי המיתולוגיה היוונית.

גיל: 14, YARDEN

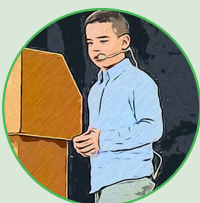
נולדתי וגדלתי בישראל. התחביבים העיקריים שלי הם קמ"י (קרוב מגן ישראלי) ורטוריקה. יש לי חגורה חומה בקמ"י, וזכיתי במקום השני בתחרות "הנואם הצעיר" בישראל. אני גם בתנועת הנוער הצופים, ואוהב לשיח.

הכותבים

MICHAEL KOSTERLITZ

פרופ' מייקל קוסטרליץ הוא פיזיקאי בריטי-אמריקאי שנולד למשפחה של מהגרים יהודים באַבְרֶדִין, סקוטלנד (Aberdeen, Scotland). אביו האנס (Hans) קוסטרליץ היה נירו-פּרֶמְקולוג הידוע כאחד המגלים הראשיים של האַנְדורפינים. פרופ' קוסטרליץ למד ב-College Gonville and Caius שבקיימברידג', אנגליה לתואר ראשון, שלאחר מכן הוסב לתואר שני. בשנת 1969 הוא קיבל תואר דוקטור בפיזיקה מאוניברסיטת אוקספורד באנגליה, ושם הוא הכיר את אשתו ברית (Berit). לאחר סיום לימודיו פרופ' קוסטרליץ היה עמית ב-Istituto di Fisica Teorica בטורינו שבאיטליה, והיה עמית מחקר באוניברסיטת ברמינגהם (Birmingham) שבאנגליה בין השנים 1970-1973. שם הוא חקר מעברי מצבים בחומרים דו-ממדיים עם פרופ' ת'אולס (Thouless), שעימו חלק את פרס נובל לפיזיקה ב-2016. לאחר כמה משרות של פוסט-דוקטורט, כולל באוניברסיטת ברמינגהם ובאוניברסיטת קורנל במדינת ניו יורק שבארצות הברית (Cornell University, New York), הוא הצטרף לפקולטה של אוניברסיטת ברמינגהם בשנת 1974. בשנת 1982 פרופ' קוסטרליץ מונה לפרופסור לפיזיקה באוניברסיטת בראון במדינת רוד איילנד שבארצות הברית (Brown University, Rhode Island) ובה הוא עובד גם כיום.

הוא זכה במספר פרסים, כולל מדליית ופרס מַקְסְוֵל (Maxwell Medal and Prize) בשנת 1981; פרס לָאָרְס אֹנְסָאָגֶר (Lars Onsager Prize) לפיזיקה סטטיסטית תיאורטית בשנת 2000; ופרס נובל לפיזיקה



בשנת 2016 על עבודתו בתחום מעברי מצב טופולוגי של הליום נוזלי. קוסטרליץ היה חלוץ בטיפוס אלפיני (טיפוס בהרי האלפים) בשנות ה-60 במאה ה-20, וידוע בהקמת מסלולים באנגליה, באלפים האיטלקיים ובפארק הלאומי יוסמיטי בקליפורניה שבארצות הברית (Yosemite, California). באלפים האיטלקיים אף יש מסלול על שמו בעמק אורקו (Orco) הנקרא "סדק קוסטרליץ" (Fessura Kosterlitz). למייל וברית יש שלושה ילדים: קארין, יונתן ואליזבט. *j_kosterlitz@brown.edu

מוזיאון המדע ע"ש בלומפילד ירושלים
متحف العلوم على اسم بلومفيلد القدس
Bloomfield Science Museum Jerusalem



הוצאת פרונטירז מדע לצעירים ישראל
Hebrew version provided by



THE SAGOL NETWORK