

אוסף מאמרי הנובל, כרך 2

עורכים

Idan Segev and Robert Knight



FRONTIERS EBOOK COPYRIGHT STATEMENT

The copyright in the text of individual articles in this ebook is the property of their respective authors or their respective institutions or funders. The copyright in graphics and images within each article may be subject to copyright of other parties. In both cases this is subject to a license granted to Frontiers.

The compilation of articles constituting this ebook is the property of Frontiers.

Each article within this ebook, and the ebook itself, are published under the most recent version of the Creative Commons CC-BY licence. The version current at the date of publication of this ebook is CC-BY 4.0. If the CC-BY licence is updated, the licence granted by Frontiers is automatically updated to the new version.

When exercising any right under the CC-BY licence, Frontiers must be attributed as the original publisher of the article or ebook, as applicable.

Authors have the responsibility of ensuring that any graphics or other materials which are the property of others may be included in the CC-BY licence, but this should be checked before relying on the CC-BY licence to reproduce those materials. Any copyright notices relating to those materials must be complied with.

Copyright and source acknowledgement notices may not be removed and must be displayed in any copy, derivative work or partial copy which includes the elements in question.

All copyright, and all rights therein, are protected by national and international copyright laws. The above represents a summary only. For further information please read Frontiers' Conditions for Website Use and Copyright Statement, and the applicable CC-BY licence.

ISSN 2296-6846
ISBN 978-2-8325-5585-9
DOI 10.3389/978-2-8325-5585-9

פרונטירז

פרונטירז הוא מוציא לאור של למעלה מ-200 כתבי-עת מדעיים בתחומים שונים בגישה חופשית. זהו ארגון הנוקט בגישה חלוצית לעולם האקדמיה, המשפר בצורה משמעותית ביותר את הדרך בה מתנהל פרסום המחקר המדעי. חזון-העל של פרונטירז הוא עולם שבו לכל האנשים יש הזדמנות שווה לקבל, לחלוק ולייצר ידע. כתב העת פרונטירז מספק גישה מקוונת מיידיית וללא עלות לכל פרסומיו, אך דבר זה כשלעצמו אינו מספיק למימוש מטרות העל הכוללות, בין השאר, הנגשת מדע לצעירים בעולם כולו ותמיכה בחוקרים ובמחקרים העוסקים בתחום שינויי האקלים והבריאות האקולוגית של כדור הארץ.

פרונטירז – מדע לצעירים

פרונטירז - מדע לצעירים הוא כתב עת של פרונטירז המיועד לצעירים. אנו מאמינים שהדרך הטובה ביותר להנגיש תגליות מדעיות פורצות-דרך לקהלים צעירים היא לאפשר לאנשים צעירים ולמדענים לעבוד יחדיו כדי להוציא לאור מאמרים שאינם רק מדויקים מבחינה מדעית, אלא גם מלהיבים ומעוררי סקרנות. מסיבה זו, אנו מזמינים מדענים בעלי שם לכתוב על אודות התגליות פורצות הדרך שלהם בשפה נגישה לקוראים צעירים. לאחר מכן הילדים עצמם, בעזרת מנחים מדעיים, מספקים משוב למדענים וכך הם עוזרים לשר את המאמרים כדי שיהיו מובנים ומלהיבים לקוראים הצעירים. פרונטירז – מדע לצעירים, מציע אוסף של מאות רבות של מאמרים מדעיים בגישה חופשית בתחומים רחבים: חקר המוח, רובוטיקה, רפואה, חקר החלל וחקר המגוון הביולוגי, הנכתבים במיוחד לקהלים צעירים על ידי מדענים בעלי שם בארץ ובעולם.

מהם אוספי המאמרים של פרונטירז – מדע לצעירים?

אוסף הוא סדרה של מאמרים שמתמקדת בנושא מחקר אחד, ונערכת על ידי מומחים בתחום. זאת, מתוך תקווה שהחומרים שאנו מרכזים באוסף כזה מאפשרים הבנה מעמיקה יותר של סוגיות העומדות בבסיס הנושא המדובר. אסופה כזאת עשויה גם לאגד מאמרים של קבוצת מדענים שזכו בהכרה מיוחדת, כמו בפרס נובל. אוספי המאמרים האלה מספקים לקהילת הקוראים הבינלאומית גישה למחקר העדכני והחשוב ביותר, ומעל לכל, הם מעצימים תלמידים ותלמידות על ידי שילובם בתהליך קבלת ההחלטות בפרסום המאמרים לעמיתיהם ולציבור הרחב. כדי לגלות כיצד תוכלו לסקור מאמר של פרונטירז – מדע לצעירים, אנא צרו קשר עם מערכת כתב העת: kids.hebrew@frontiersin.org



אוסף מאמרי הנובל, כרך 2

עורכי האוסף

חברט נייט, אוניברסיטת ברקלי, קליפורניה, ארה"ב
עידן שגב, האוניברסיטה העברית בירושלים, ירושלים, ישראל

ציטוט

Segev, I., Knight, R., eds. (2024). *The Nobel Collection, volume 2*
Lausanne: Frontiers Media SA. doi: 10.3389/978-2-8325-5585-9

איורים

FourPlus Studio

תחומים משתתפים



מדעי המוח
ופסיכולוגיה



בריאות האדם



אסטרונומיה ופיזיקה



מתמטיקה וכלכלה



כימיה וחומרים

אודות האוסף שלפניכם

האוסף השני והיחודי של מאמרי הנובל שלנו מציג בפניכם מאמרים נוספים שנכתבו על ידי כלות וחתני פרס נובל, במיוחד עבור צעירות וצעירים. האנשים המרשימים האלה, שמובילים את חזית המחקר בעולם, מסבירים את התגליות פורצות הדרך שלהם וכיצד הם גילו אותן. הם גם חולקים את מחשבותיהם על הדרכים לפתח קריירה בתחומי המדע ונותנים עצות כיצד להפוך לחוקרים וחוקרות מצליחים ולחיות חיים מספקים ומאושרים. כמו כל מאמר שמפורסם בפרונטירז – מדע לצעירים, גם המאמרים באוסף הזה נסקרו ואושרו לפרסום על ידי צעירים וצעירות כמוכם!

מהם פרסי הנובל?

יצר הסקרנות אצל בני האדם מאוד מפותח – אנחנו להוטים להבין את עצמנו ואת העולם שסביבנו. הבנה מדעית עמוקה היא הכרחית כדי למצוא פתרונות לכל האתגרים הגלובליים שאנחנו מתמודדים איתם, ממחלות כמו קורונה ועד משבר האקלים. מדענים וחוקרים מקדישים את חייהם למחקר והבנה של חוקי הטבע ושל החיים עצמם. תוצאות המחקר של כל חוקרת וחוקר תורמות לגוף הידע שיש לאנושות. מידי פעם, תגליות חדשות משנות לחלוטין את הדרך שבה אנחנו מבינים את היקום ואת עצמנו – לדוגמה, התגליות המפורסמות ופורצות הדרך של אלברט איינשטיין בפיזיקה תאורטית, או העבודה המהפכנית של מארי סקלודובסקה קירי (Curie), שהובילה לגילוי יסודות חדשים שמרכיבים את החומר, לפיתוח של טיפולים מתקדמים באמצעות קרני רנטגן ולריפוי סרטן. בכל שנה, התגליות משנות החיים הללו מקבלות את הכבוד הראוי להן באמצעות פרסי הנובל, שנוסדו בצוואתו של אלפרד נובל. הפרסים מוענקים משנת 1901 והם מייצגים את ההכרה הגבוהה ביותר בחשיבות של מחקר מדעי. בכתב העת שלנו מופיעים זוכי פרסי הנובל בכימיה, פיזיקה, כלכלה וגם פיזיולוגיה או רפואה.

ידעתם שאתם, הקוראים של כתב העת שלנו, חולקים תכונה חשובה עם הזוכים והזוכות בפרסי הנובל? התכונה הזו היא **סקרנות**. המנוע מאחורי המסע המדעי של כל חתן וכלת פרס נובל הוא החיפוש הנמרץ והמתמשך אחרי תשובות – כלומר, אותה הסקרנות שמניעה אתכם לקרוא את המאמרים האלה.

כפי שאמרה לנו זוכת פרס הנובל הנורבגית, מיי-ג'ריט מוקר: "כמדענית, אני מרגישה ברת-מזל על שזכיתי באפשרות לשאול שאלות שאני חושבת שהן חשובות. אני מקווה שהמאמרים בכתב העת הזה יעזרו לטפח ולחזק את התשוקה והסקרנות של ילדים למדע – איזו מתנה זו תהיה לאנושות!".

תנו לאוסף היחודי הזה להצית בכם סקרנות ותשוקה ולעודד אתכם לחפש ולגלות דברים חדשים בחיכם!



THE SAGOL NETWORK



קרן **שש**
שעשוע
Family Foundation

תוכן העניינים

ניטרינו: חלקיקי הרפאים המרכיבים את היקום שלנו Art McDonald	05
כוח הטלומרים: איך לחיות חיים ארוכים יותר ובריאים יותר Elizabeth Blackburn	18
איך הופכים רנ"א לדנ"א? התגלית ששינתה את פני הביולוגיה והביוטכנולוגיה David Baltimore	31
איך לוכדים אטום? סיפורים על מדידת הזמן ועל אפשרויות שימוש בעתיד Noa Segev and David Wineland	41
שחבור רנ"א – איך מבצעים פעולות 'גזירה' ו'הדבקה' של גנים? Phillip A. Sharp	53
מערכת חוש הריח: החיים מריחים טוב Richard Axel	63
הקסמים של נוזלי-העל מנצחים את כוח המשיכה Michael Kosterlitz	72
תאי מיקום: תאי המוח שעוזרים לנו למצוא את דרכנו בעולם John O'Keefe	82
מהפכת הרזולוציה – רואים את מולקולות החיים בעזרת מיקרוסקופ האלקטרוני הקריוגני Noa Segev and Richard Henderson	90
כלכלה: הרבה יותר מקסוף Angus Deaton	100





ניטרינו: חלקיקי הרפאים המרכיבים את היקום שלנו

Art McDonald*

המחלקה לפיזיקה, פיזיקה הנדסית ואסטרונומיה, אוניברסיטת קווינס, קינגסטון, אונטריו, קנדה

סוקרים צעירים

RYAN

גיל: 15



בתחום האסטרופיזיקה החלקיקית, מדענים מנסים להבין את נקודת ההתחלה של היקום, וכיצד הוא פועל ברמה הבסיסית ביותר. אנו משתמשים בחלקיקים ממקורות אסטרופיזיים כדי ללמוד על אודות חוקי הפיזיקה בקנה המידה הקטן ביותר האפשרי של החומר. כמו כן אנו מפתחים נוסחאות מתמטיות המתארות את מערכות היחסים בין החלקיקים היסודיים המרכיבים את היקום שלנו. עמיתי ואני חקרנו את חלקיקי הניטרינו, שהם בין אבני הבניין הבסיסיות ביותר ביקום. מחקר זה מסייע לנו להבין איך היקום התפתח מאז שהחל במפץ הגדול, לפני כ-13.8 מיליארד שנים. במאמר זה, אספר לכם על אודות 'חלקיקי הרפאים' המכונים חלקיקי ניטרינו – מהם, כיצד אנו מודדים אותם, ומדוע התגלית שלנו הובילה לשינוי גדול בשיטות המדידה שהיו מקובלות עד אז. בתהליך זה, תיוכחו כיצד היסודות החמקמקים ביותר סביבנו עשויים להיות לעיתים גם הכי חשובים.

פרופסור ארט מקדונלד זכה בפרס נובל בפיזיקה לשנת 2015, במשותף עם פרופסור טקאקי קג'יטה, עבור תגלית תנודות חלקיקי הניטרינו, המראה כי לחלקיקים הללו יש מסה.

חלקיקי נְיִטְרִינוֹ: חלקיקים יסודיים

ממה מורכב היקום, ואיך הוא התפתח מאז המפץ הגדול? אלו הן בין השאלות המרתקות ביותר שאנו יכולים לשאול את עצמנו. כדי לענות עליהן מבחינה מדעית, ביכולתנו להשתמש בכמה גישות ובשיטות שונות. אני מגיע מתחום האסטרופיזיקה החלקיקית – תחום מחקר חדש יחסית, שבו חוקרים את החלקיקים הבסיסיים שנעים בחלל, ובמיוחד את החלקיקים המגיעים לכדור הארץ. החוקרים בתחום זה מנסים להבין את טבעם של החלקיקים הבסיסיים המרכיבים את החומר, ולהתחקות אחר הכוחות השולטים במערכות היחסים בין החלקיקים הללו. באופן כללי, אנו מנסים לפתח שיטות ניסוי שמטרתן למצוא את החלקיקים הקטנים ביותר, המכונים **חלקיקי יסוד** – חלקיקים שלא ניתן לחלקם לחלקיקים קטנים יותר. בהסתמך על הממצאים שמתקבלים, אנו מפתחים 'מוֹדֵל תֵּיאֹרֵטִי'. זהו מערך של רעיונות ומשוואות המסביר כיצד החומר נוצר מחלקיקי היסוד הללו. אף פעם איננו אומרים שהמודל שלנו הוא המיטבי, כיוון שכל גרסה של המודל מבוססת על רמת ההבנה הנוכחית שלנו, הנסמכת על רגישות מכשירי המדידה שיש לנו בזמן נתון, או על יכולת המיקוד שלהם. לאורך השנים, מפתחים מכשירים יותר ויותר רגישים, וכתוצאה מכך אנו לומדים דברים חדשים ומרגשים על אודות אבני הבניין היסודיות של החומר, ולגבי היקום שבו אנו חיים.

המודל הוותיק המאגד את החלקיקים ואת הכוחות הפועלים ביניהם מכונה **המוֹדֵל הֶסְטֵנְדֵרְטִי של חלקיקי היסוד [1]** (להלן: 'המודל הסטנדרטי'). לחצו כאן כדי ללמוד עוד על אודותיו). לפי מודל זה, כל החומרים, ובכלל זה האטומים המרכיבים את גוף האדם, האוויר שאנו נושמים והאור שאנו מקבלים מהשמש, מורכבים מחלקיקי יסוד. החלקיקים הללו נוצרו במהלך **המפץ הגדול**, לפני כ-13.8 מיליארד שנים, ובמהלך האבולוציה של היקום שהתרחשה אחריו.

עם חלקיקים היסוד נמנים אֶלֶקְטְרוֹנִים, קווארקים ו**חלקיקי נְיִטְרִינוֹ** (איור 1A), כמו גם חלקיקים אחרים שאולי שמעתם עליהם דוגמת פוטונים, בוזונים, גלואונים וחלקיקי היגס. במאמר זה נתמקד בחלקיקי נייטרינו. כל חלקיקים היסוד משפיעים זה על זה באמצעות ארבעה כוחות יסוד המכונים 'הכוח החזק'; 'הכוח החלש'; 'הכוח האלקטרוֹמְגְנֵטִי' ו'כוח הכבידה'. קווארקים הם אבני היסוד של הפרוטונים ושל הניוטונים. הפרוטונים והניוטונים מרכיבים את גרעיני האטומים, המוקפים אלקטרונים (איור 1B).

חלקיקי נייטרינו נפלטים מחומרים שבאופן טבעי הם **רַדְיוֹאֶקְטִיבִּים**, ובמהלך תגובות מסוימות שביכולתנו לייצר במכשירים מדעיים המכונים 'מאיצים'. אך צורת ההיווצרות הנפוצה ביותר של חלקיקי נייטרינו היא בתגובות גרעיניות המתרחשות בשמש, בתהליך שנקרא 'היתוך גרעיני'. במסגרת תהליך זה, גרעינים של שני אטומים משתלבים ויוצרים אטום אחד, כבד יותר. בתוך כך הם משחררים כמויות עצומות של אנרגיה ושל חלקיקים, לרבות חלקיקי נייטרינו. לחלקיקי הנייטרינו הללו נדרשות שתי שניות לצאת מהשמש, וכ-8 דקות להגיע לכדור הארץ. מספרם עצום – כדי לתת לכם מושג, בכל שנייה, 65 מיליארד חלקיקי נייטרינו סולאריים (כלומר מהשמש) חוצים כל סנטימטר רבוע על פני כדור הארץ!

חלקיקי נייטרינו הם חלקיקי יסוד יוצאי דופן, כיוון שפעולתם ההדדית על חומר מתרחשת רק על ידי שניים מתוך ארבעת כוחות היסוד – כוח הכבידה והכוח החלש (הכוח החלש יכול לאפשר לנייטרינו לשנות נייטרון לפרוטון ולאלקטרון). כיוון שלחלקיקי הנייטרינו כמעט

חלקיקי יסוד (Fundamental particles)

החלקיקים הקטנים ביותר שמרכיבים את כל החלקיקים האחרים.

המוֹדֵל הֶסְטֵנְדֵרְטִי של החלקיקים היסודיים (Standard model of fundamental particles)

מודל של חלקיקים היסוד והאינטראקציות ביניהם באמצעות כוחות הטבע.

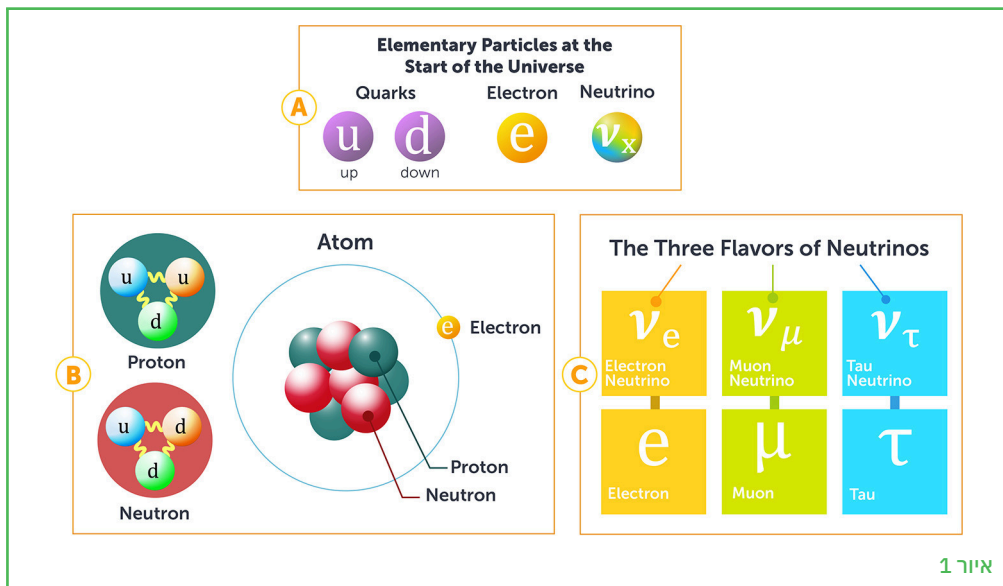
חלקיקי נְיִטְרִינוֹ (Neutrinos)

חלקיקי יסוד המקיימים אינטראקציה באמצעות כוח הכבידה והכוח החלש.

רַדְיוֹאֶקְטִיבִּיּוּת (Radioactivity)

פליטה ספונטנית של חלקיקי אנרגיה הנובעת מהתפרקות גרעין האטום.

איור 1



איור 1

חלקיקי יסוד (A) לפי המודל

הסטנדרטי, היקום החל בהיווצרות חלקיקי יסוד המכונים קווארקים (Quarks), אלקטרוני (Electron), וחלקיקי נייטרינו (Neutrino). ישנם כמה סוגי קווארקים בהם קווארק למעלה (Up quark) המסומן כ-u; וקווארק למטה כ-d; המסומן כ-d; ושלושה סוגים של חלקיקי נייטרינו המסומנים כ-ν_x, כאשר ה-ν מציין את הנייטרינו, וה-X מייצג אחד משלושה סוגים. (B) קווארקים הם אבני הבניין הן של הפרוטונים (Proton) הן של הנייטרונים (Neutron).

הפרוטונים והנייטרונים מרכיבים את גרעיני האטומים (Atom), והאלקטרונים חגים סביב גרעין האטום. (C) ישנם שלושה סוגים, או 'טעמים', של חלקיקי נייטרינו, והם פועלים בהשפעה הדדית על שלושה חלקיקי יסוד: האלקטרון (Electron Neutrino), המיואון (Muon Neutrino), והטאון (Tau Neutrino). מקרא:

Elementary particles at the start of the universe = חלקיקים היסוד שנוצרו בתחילת היקום
The three flavors of Neutrinos = שלושת ה'טעמים' של חלקיקי נייטרינו.

'טעמים' (של חלקיקי נייטרינו) (Neutrino flavor)

מאפיין של חלקיקי נייטרינו המגדיר את סוגיהם. ישנם שלושה טעמים מובחנים: נייטרינו אלקטרוני, נייטרינו מיואון, ונייטרינו טאון.

אין מָסָה, כוח הכבידה שהם מפעילים הוא קטן מאוד וכמעט בלתי ניתן לאיתור. באשר לכוח החלש – על חלקיקי הנייטרינו להיות קרובים מאוד לפרוטונים, נייטרונים או אלקטרונים אחרים כדי שתרחש אינטראקציה (פעולה הדדית) ביניהם. מסיבות אלו, קשה מאוד לאתר את חלקיקי הנייטרינו [2]. ניתן לומר שהם יכולים לעבור דרך חומר רגיל כמעט כאילו היו 'שקופים'. למעשה, הפעולה ההדדית בין חלקיקי נייטרינו לחומר מתרחשת רק כאשר הם פוגעים ישירות בגרעין האטום או באלקטרונים הסובבים אותו. זה קורה לעיתים די נדירות, כיוון שמרבית נְפֶח האטום הוא חלל ריק. במקרים אחרים, חלקיקי נייטרינו עוברים דרך החומר ללא הפרעה – ובכלל זה מיליארדים רבים מהם שחולפים דרך גוף האדם מְדֵי שנייה! היות שחלקיקי נייטרינו נקלטים על ידי הַגְלָאִים שלנו בצורה כה חלשה, קשה מאוד לראותם ולמדוד את תכונותיהם. הודות לאינטראקציות הנדירות שלהם עם חומר, יש אנשים המכנים את חלקיקי הנייטרינו 'רוחות הרפאים של היקום'.

על אף שהם חמקמקים ומאֶתגרים למדידה, חלקיקי נייטרינו ממלאים תפקיד מרכזי ביצירת היקום, ומסייעים ליצור מבנים כמו כוכבים וּגְלַגְלִיּוֹת. הם גם עזרו ליצור חלק מהיסודות הבסיסיים שנוצרו בראשית היקום, במהלך המפץ הגדול.

נהוג לסווג את חלקיקי הנייטרינו לשלושה סוגים, או 'טעמים': נייטרינו אלקטרוני; נייטרינו מיואון ונייטרינו טאון. כל 'טעם' מקיים אינטראקציה עם החלקיק היסודי התואם – אלקטרון, מיואון וטאון (איור 1C) [3]. איננו יודעים בדיוק מדוע ישנם רק שלושה סוגי חלקיקי נייטרינו, אך אלו הם הסוגים שגילינו עד כה, והם תואמים את תחזיות המודל הסטנדרטי. כפי שתראו בהמשך, התגלית החשובה שלנו, שזיכתה אותי ואת פרופסור טקאקי קג'יטה בפרס נובל בפיזיקה לשנת 2015, קשורה לשינויים ב'טעמים' של חלקיקי הנייטרינו כאשר הם נעים בחלל, מליבֶת השמש אל כדור הארץ.

הדרך שבה מדדנו את חלקיקי הנייטרינו

כאשר התחלנו לחקור את חלקיקי הנייטרינו, הייתה בעיה בלתי פתורה בתחום האסטרופיזיקה החלקיקית, בשם 'בעיית חלקיקי הנייטרינו הסולאריים' [4]. כדי למדוד את

חלקיקי הנייטרינו נִבְּנוּ גִּלְאִים מיוחדים, אך הם הצביעו על כך שמספר חלקיקי הנייטרינו האלקטרוניים המגיעים מהשמש שנמדד, היה נמוך בהרבה מהמספר אשר לו ציפינו. את השערתנו לגבי מספר זה ביססנו על חישובים אמינים מאוד של השֵׁרָפָה המתרחשת בשמש. הסתירה שבין המספר המצופה של חלקיקי הנייטרינו המגיעים מהשמש לכדור הארץ, למספר שהתקבל במדידות שערכנו, הייתה עשויה להצביע על אחת משתי אפשרויות: או שהיה צורך לעדכן את המודל הסטנדרטי ולשנות את הדרך שבה אנו חושבים על אודות חלקיקי נייטרינו, או שהיה צורך לשנות את הדרך שבה אנו מחשבים את מספר חלקיקי הנייטרינו המגיעים מהשמש. לשתי האפשרויות היו השלכות משמעותיות על האופן שבו אנו מבינים את היקום, ולכן, רבים מחוקרי האסטרופיזיקה החלקיקית התאגדו למשימה משותפת – תכנון ניסוי שיפתור את בעיית חלקיקי הנייטרינו הסולאריים.

כפי שהזכרתי קודם לכן, לא ניתן למדוד את חלקיקי הנייטרינו על ידי אינטראקציה ישירה עם הגִּלְאִים שלנו. בְּמִקוּם זֶאת, בדרך כלל מודדים את חלקיקי הנייטרינו בצורה עקיפה, על ידי שימוש בהשפעות המתרחשות כאשר חלקיקי יסוד משתחררים בתהליכים רדיואקטיביים. לדוגמה, אפשר למדוד נייטרינו אלקטרוני כשמשמש משים בתהליך רדיואקטיבי בשם **דעיכת בטא**, שבמהלכו נפלט אלקטרון. אז, אנו יכולים למדוד את האנרגיה של האלקטרונים שהשתחררו. במקור, מדענים האמינו כי רק אלקטרונים נפלטים בתהליך הזה, לכן הם ציפו למדוד אנרגיה בודדת עבור כל האלקטרונים שנפלטו. במקום זאת, הם קיבלו מְנֻעָד שלם של אנרגיות נמוכות יותר מהאלקטרונים שהשתחררו! כדי להסביר את מנעד האנרגיות שהשתחררו, המדענים הניחו כי ישנו **חלקיק נוסף** (הנייטרינו האלקטרוני) שנפלט. כך הם מדדו בצורה עקיפה את חלקיקי הנייטרינו האלקטרוני, על ידי בחינת 'האנרגיה החסרה' של האלקטרונים שנפלטו במהלך דעיכת בטא.

הניסוי שלנו, שהתקיים ב**מצפה חלקיקי הנייטרינו בסדברי** (SNO, Sudbury Neutrino Observatory), נערך בעומק שני קילומטרים במעבה האדמה בקנדה (**אזור 2A ונספח**). השתמשנו בו בגישה דומה כדי למדוד חלקיקי נייטרינו באופן עקיף, דרך השפעתם על סוג מסוים של מים, המכונים **מים כבדים**. כפי שאתם יודעים, מים רגילים (H_2O) מורכבים מאטום אחד של חמצן (O) ומשני אטומים של מימן (H). בגרעין המימן יש פרוטון אחד. לעומת זאת המים הכבדים (D_2O) מכילים אטום אחד של חמצן, אך שני אטומים של דֵּאוּטֵריום (D). נוסחתם הכימית של מים כבדים נכתבת גם כן: 2H_2O . בגרעין הדֵּאוּטֵריום יש פרוטון אחד ונייטרון אחד (במילים אחרות, זהו אטום מימן עם נייטרון נוסף) המוסיף 10% למשקל המים, אך לא משנה כל כך את תכונותיהם הכימיות. המים הכבדים נוצרים באופן טבעי – אחת מתוך 6,400 מולקולות של מים היא מולקולת D_2O .

בניסוי שערכנו ב-SNO, מילאנו מְקַל גדול במים כבדים טהורים, ומדדנו את השפעות ההתנגשויות בין חלקיקי הנייטרינו שהגיעו מהשמש, למים הכבדים. למעשה, מדדנו שתי תגובות המתרחשות כאשר חלקיקי נייטרינו מתנגשים עם מים כבדים. בתגובה הראשונה, חלקיק נייטרינו אלקטרוני מקיים אינטראקציה עם אטום הדֵּאוּטֵריום של המים הכבדים. אינטראקציה זו משנה את הנייטרון בגרעין האטום לפרוטון, ולאלקטרון מהיר-תנועה שמייצר אור (**אזור 2B**, תגובה 1). מדדנו את האור שהאלקטרון הזה מייצר. בתגובה השנייה, חלקיקי נייטרינו מכל שלושת ה'טעמים' (אלקטרוניים, מיואונים וטאוניים) מקיימים אינטראקציה עם אטום הדאוטריום. באינטראקציה זו הגרעין של אטום הדאוטריום מתחלק לפרוטון ולנייטרון הנע בחופשיות. את הנייטרון החופשי, הנע דרך המים הכבדים, זיהנו בדרכים שונות

מים כבדים (Heavy Water)

מים המכילים אטומים של דֵּאוּטֵריום במקום אטומים של מימן. בגרעין של אטום הדאוטריום יש פרוטון אחד ונייטרון אחד, בעוד שבגרעין אטום המימן יש רק פרוטון אחד. מבחינה כימית, הדאוטריום מתנהג כמו מימן.

איור 2

מצפה הנייטרינו

התת-קרקעי בסדברי לזיהוי חלקיקי נייטרינו. (A) ניסוי

חלקיקי הנייטרינו ב-SNO התקיים כ-2,100 מטרים מתחת לפני הקרקע. הוא תוכנן לאתר חלקיקי נייטרינו סולאריים באינטרקציות שלהם עם מים כבדים. המצפה כולל חדר נקי (Clean room) שממנו המדענים יכלו להנמיך ציוד לתוך אזור המדידה, ואזור מדידה מלא במים אולטרה-טהורים

אולטרה-טהורים (Ultra-pure water) במטרה

לחסום את הרדיואקטיביות

הבוקעת מהסלעים סביב.

מילאנו את כדור האקריליק

שבמרכז במים כבדים

(Heavy water), והקפנו אותו

בכדור המכיל צינורות

פוטואלקטריים

(Phototubes) כדי למדוד את

השפעות חלקיקי הנייטרינו

הפוגעים במים הכבדים

(קרדיט לתמונה: פרופסור

מקדוולד). (B) מדדנו שתי

תגובות: (1) האינטראקציות

בין חלקיקי נייטרינו

אלקטרוניים

(Electron Neutrino) לגרעין

הדאוטריום

(Deuterium nucleus),

ו-(2) האינטראקציות של כל

שלושת 'טעמי' חלקיקי

הנייטרינו (All Neutrinos)

עם גרעין הדאוטריום.

מקרא:

Reaction = תגובה

= Fast-moving electron

אלקטרון מהיר-תנועה.

צינורות פוטואלקטריים

(Phototubes)

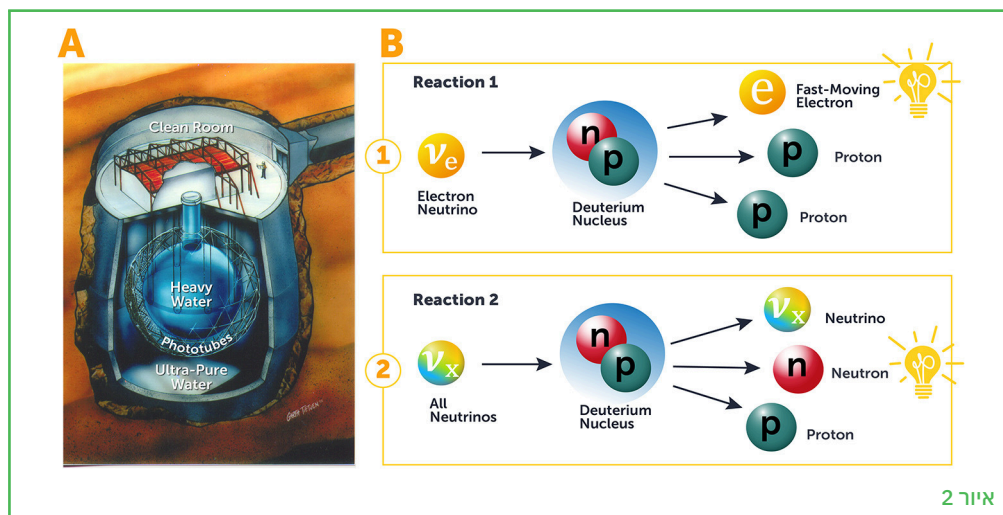
חיישני אור שעוזרים לנו

למדוד את האור שנוצר

כתוצאה מהאינטראקציה בין

חלקיקי נייטרינו

למים הכבדים.



איור 2

בשלושת שלבי הפרויקט. בשלב הראשון, הנייטרון נלכד על ידי אטום אחר של דאוטריום, ומייצר אור בעל תכונות שונות מאלה של האור הנוצר בתגובה 1 (איור 2B, תגובה 2).

נסכם עד כה – קיבלנו שתי תגובות של חלקיקי נייטרינו עם מים כבדים. תגובות אלה יצרו אור. הצלחנו למדוד אותו באמצעות גלאי האור שלנו, הנקראים צינורות פוטואלקטריים. מכך נובע כי יכולנו למדוד באופן עקיף את נוכחותם של חלקיקי הנייטרינו.

השקענו מאמץ רב כדי לוודא שמדדנו רק את ההשפעות של חלקיקי הנייטרינו, ולא של אף מקור קרינה אחר. כיוון שנאלצנו להגן על הגלאים שלנו מפני הרדיואקטיביות המגיעה מהסביבה החיצונית, היה עלינו למקם את הגלאים בעומק של כ-2 קילומטרים מתחת לפני האדמה, בלב הסלע (איור 2A). רצינו גם לוודא שאיננו מודדים את הרדיואקטיביות המגיעה מהסלע עצמו. לצורך כך היה עלינו להגן באופן מיוחד על אזור המים הכבדים שלנו מפני אורניום ותוריום – שני יסודות רדיואקטיביים המצויים בסלעים. כדי לעשות זאת, הקפנו את מכל המים הכבדים שלנו במים אולטרה-נקיים. אלו מים הנקיים מיסודות רדיואקטיביים פי מיליארד בהשוואה למי ברז. מים אלה לכדו את הרדיואקטיביות מהסלע. כמו כן, בנינו את הגלאי מחומרים שבחרנו בקפידה, המתאפיינים ברדיואקטיביות נמוכה. יצרנו אוויר אולטרה-נקי, והעובדים שלנו עברו תהליך של ניקיון, שכלל ביצוע מקלחות ולבישת ביגוד נטול מוך (מצבור סיבי בד הנושרים מהבגד).

כדי למדוד את האור שנפלט כתוצאה מהאינטראקציה בין חלקיקי הנייטרינו למים הכבדים, התקנו צינורות פוטואלקטריים רבים סביב מכל המים הכבדים. היה מאתגר מאוד ליצור את המערך הניסיוני הזה – הוא כלל גם אתגר הנדסי משמעותי, וגם ניסוי פיזיקלי מורכב (כדי ללמוד עוד על אודות ההיבט ההנדסי של הפרויקט, ראו בנספח).

איפה חלקיקי הנייטרינו החסרים?

כפי שצינתי קודם, האתגר שעמד בפנינו היה לפתור את בעיית חלקיקי הנייטרינו הסולאריים, שלפיה מספר חלקיקי הנייטרינו האלקטרוניים הנמדדים כשהם מגיעים לכדור

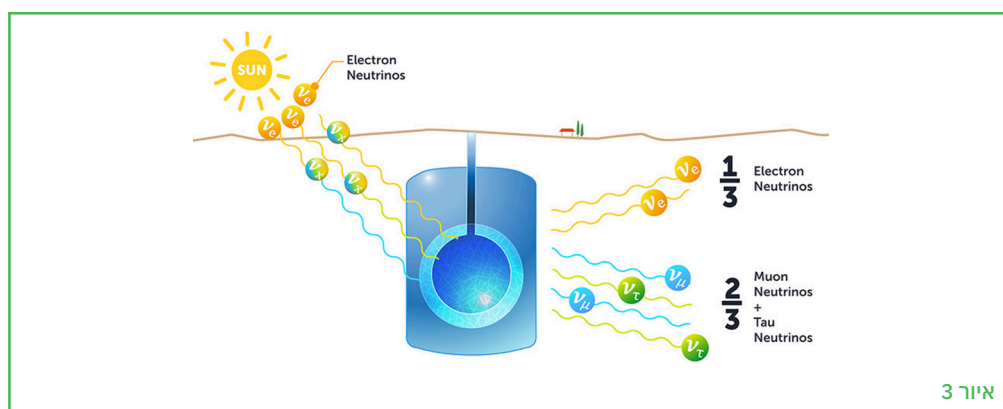
הארץ היה קטן בערך פי שלושה מהמספר הצפוי. הנחנו כי ייתכן שהניסוי או התיאוריה (או שניהם) אינם נכונים, או שאולי חלקיקי הנייטרינו האלקטרוניים מהשמש שינו את 'טעמיהם' ולא זוהו בניסויים שמטרתם הייתה לאתר רק, או בעיקר, חלקיקי נייטרינו אלקטרוניים.

בניסוי שלנו, רצינו לבדוק אם שינוי ה'טעמים' התרחש לפני שחלקיקי הנייטרינו הגיעו לכדור הארץ. ידענו כי בליבת השמש נוצרים רק חלקיקי נייטרינו אלקטרוניים (מיואונים וטאוונים כבדים יותר מאלקטרוניים, ולכן נדרשת יותר אנרגיה מזו שקיימת בשמש כדי לייצר אותם ואת חלקיקי הנייטרינו המקושרים אליהם). המשמעות היא שאם חלק מחלקיקי הנייטרינו המגיעים מהשמש אינם חלקיקי נייטרינו אלקטרוניים, הם ודאי שינו את סוגיהם במסע מליבת השמש אל כדור הארץ. ככלל, חלקיקי נייטרינו משנים את 'טעמיהם' באופן מחזורי, במסגרת תופעה קוונטית בשם 'תנודת חלקיקי נייטרינו' (תוכלו לקרוא על כך עוד כאן). כיוונו את הגלאים שלנו לטווח מסוים של אנרגיה, וכך הצלחנו לזהות את ההשפעות של חלקיקי נייטרינו שמקורם בשמש, ולא במקורות אחרים (כמו קרינה קוסמית שפולטת חלקיקי נייטרינו באנרגיות גבוהות יותר). באנרגיות שחקרנו, השמש היא זו שמייצרת את רוב חלקיקי הנייטרינו שמגיעים לכדור הארץ.

באחת המדידות שערכנו בגלאי שלנו, הבחנו באינטראקציה של חלקיקי נייטרינו אלקטרוניים עם אטומים של דאוטריום, שהובילה לפליטה של אלקטרון חופשי מהיר-תנועה, כפי שתארנו קודם לכן. במדידה נפרדת, צפינו באינטראקציות של חלקיקי נייטרינו משלושת הסוגים עם אטומי הדאוטריום, שהובילו לפליטה של נייטרוון חופשי. במילים אחרות, המדידה הראשונה הצביעה על כמות חלקיקי הנייטרינו האלקטרוניים המגיעים מהשמש, בעוד המדידה השנייה הצביעה על המספר הכולל של כל חלקיקי הנייטרינו המגיעים מהשמש. כשהשוונו את התוצאות, גילינו כי רק שליש מהכמות הכוללת של חלקיקי נייטרינו שמקורם בשמש הם חלקיקי נייטרינו אלקטרוניים. כלומר שני שלישים מחלקיקי הנייטרינו שינו את 'טעמיהם' מחלקיקי נייטרינו אלקטרוניים, לחלקיקי נייטרינו מיואונים או טאוונים (איור 3) [2, 5]. הניסוי שלנו הראה כי נייטרינו אלקטרוני יכול לשנות את סוגו כשהוא נע. אם כן, זה הפתרון לבעיית חלקיקי הנייטרינו הסולאריים!

איור 3

חלקיקי הנייטרינו משנים את 'טעמיהם' כשהם נעים מליבת השמש לכדור הארץ.



אחת ההנחות המקוריות במסגרת המודל הסטנדרטי הייתה כי לחלקיקי נייטרינו אין מסה, וכי הם נעים במהירות האור. כאשר מביאים בחשבון שיקולים הנובעים מתורת היחסות של איינשטיין, התגלית של תנודות חלקיקי הנייטרינו רמזה על כך שלחלקיקי נייטרינו יש מסה. במאמר זה לא אסביר בפירוט מדוע העובדה שלפיה החלקיקים הללו משנים את 'טעמיהם'

במסעם בחלל, מלמדת על כך שיש להם מסה. אולם אציין כי באופן כללי, תורת היחסות של איינשטיין קובעת כי השינוי המחזורי הזה ב'טעם' מצביע על כך שמבחינת חלקיקי הנייטרין, הזמן חולף. אם חלקיקי הנייטרין חווים זמן, המשמעות היא שהם נעים לאט יותר ממהירות האור, ולכן יש להם מסה. הניסוי שלנו, כמו גם מדידות מניסוי הסופר-קמיון קנדה שנערך ביפן, שאיתו חלקנו את פרס נובל, סיפקו את הראיות הראשונות לכך שהפיזיקה חורגת מעבר למודל הסטנדרטי. הרחבת המודל הסטנדרטי תספק לנו הבנה מלאה יותר של היקום שלנו, ברמה בסיסית ביותר. אנשים רבים עבדו במשך תקופה ארוכה כדי להגיע להישג הגדול הזה. אני אסיר תודה לכל המעורבים בפרויקט חשוב זה, ומרגיש בר מזל על חלקי בו. אומנם זכיתי בפרס נובל, אך אני רואה את עצמי כנציג של כל עמיתיי המוכשרים והמסורים, שתרמו להצלחת הפרויקט.

המלצות למוחות צעירים

גדלתי בעיר קטנה מאוד בקנדה שהתמחתה בייצור פלדה. תושבי המקום הביעו כבוד גדול לערך החינוך, אף אף אחד לא ציפה כי מי מהם יזכה בפרס נובל. המסר שאני מבקש להעביר לכם הוא שאם תעבדו מספיק קשה, ותמצאו עמיתים מצוינים לעבודה משותפת, תהיה בידי כל אחת ואחד מכם האפשרות להפוך את החיים למשמעותיים מאוד, ואולי אפילו לזכות בפרס כמו פרס נובל.

כדי לבחור קריירה מתאימה, אני מציע לכם לחשוב על כמה דברים שאתם שמחים לעשות עם ההתעוררות בבוקר, ולנסותם. כך תראו במה אתם טובים! זה מה שאני עשיתי, ואני מאמין שזו דרך מצוינת לבחירת קריירה. לאחר שבחרתם משהו, התמידו בנתיב הזה, וטפחו מערכות יחסים חיוביות וחבריות עם האנשים שסביבכם – יש להם תפקיד מרכזי בהצלחתכם.

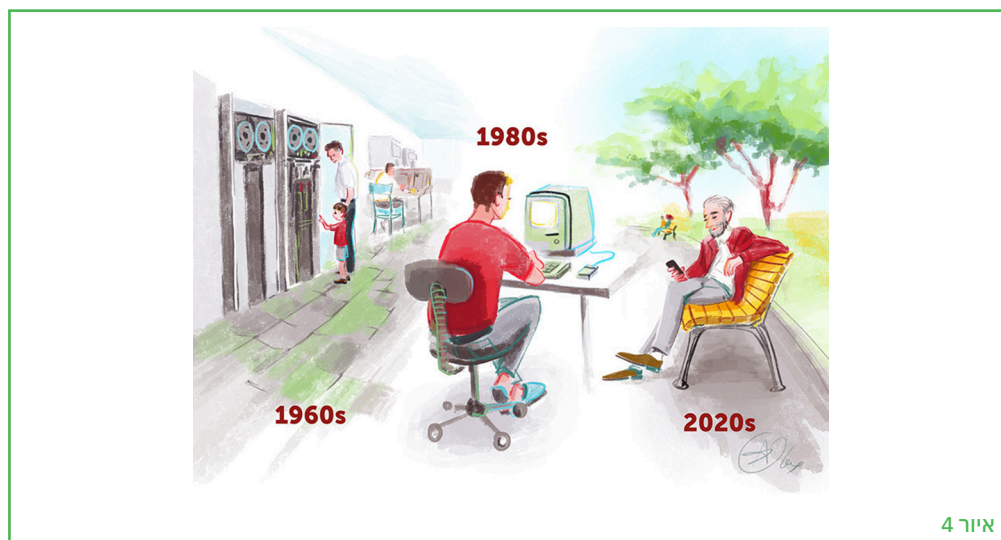
חשוב מאוד גם להישאר סקרנים לאורך החיים, כיוון שהעולם, והמדע בפרט, ממשיכים להשתנות במהירות. אולי לא תאמינו, אבל כשלמדתי באוניברסיטה בשנת 1964, האוניברסיטה קיבלה את המחשב הראשון שלה. הוא היה כה גדול וכבד, שהיה צריך להרים אותו עם מנוף, ולהוריד אותו אל תוך בניין הפיזיקה דרך הגג! כיום, לרבים מכם ודאי יש מחשבים ניידים, או אפילו טלפונים ניידים שהם חזקים הרבה יותר, וקטנים משמעותית מהמחשבים המוקדמים הללו (איור 4). זו אחת הדוגמאות לשינויים המדעיים הגדולים שהתרחשו במהלך הקריירה שלי, ואני מעריך שהקצב המסחרר הזה יישמר. מסיבה זו, המשיכו להיות סקרנים, ללמוד דברים חדשים ולהסתגל לפיתוחים חדשים. יתרה מזו זכרו שאתם, הצעירים, עולים על כולם בעבודה עם טכנולוגיות חדשות ובפיתוחן, לכן אתם יכולים לתרום המון! אל תהססו ללמוד כמה שיותר על אודות הטכנולוגיות הכי חדשניות, ונסו להעביר את הידע הזה הלאה וללמד אחרים – אפילו את עמיתכם המבוגרים יותר.

חומרים לקריאה נוספת

[Ain't no stopping them now with Art McDonald \(Nature video\).](#)

איור 4

שִׁמְרוּ עַל סִקְרֹנוֹת, כִּיּוֹן
שֶׁעוֹלָם מִשְׁתַּנֵּה בְּמַהֲרָה.
הַטֶּכְנֹלוֹגְיָה הַתְּפֹתָחָה
בְּמַהֲרָה מֵאֵז שֶׁהֵיִיתִי
סְטוּדֵנְט בְּשָׁנוֹת הַ-60' שֶׁל
הַמָּאָה הַקּוֹדֶמֶת. אֲנִי מֵאֲמִין
שֶׁהַקֶּצֶב הַמְהִיר הַזֶּה יִשְׁמַר
גַּם בְּעֵתִיד.



איור 4

תודות

ברצוני להודות לנועה שגב על עריכת הריאיון שהיווה את הבסיס למאמר זה, ועל כתיבה משותפת של המאמר. תודה לאלכס ברנשטיין עבור (איורים 1-4).

מקורות

1. Cottingham, W. N., and Greenwood, D. A. 2007. *An Introduction to the Standard Model of Particle Physics*. New York, NY: Cambridge University Press.
2. McDonald, A. B. 2016. Nobel lecture: the Sudbury Neutrino Observatory: observation of flavor change for solar neutrinos. *Rev. Modern Phys.* 88:030502. doi: 10.1103/RevModPhys.88.030502
3. Acker, A., and Pakvasa, S. 1997. Three neutrino flavors are enough. *Phys. Lett. B* 397:209–15. doi: 10.1016/S0370-2693(97)00174-3
4. Haxton, W. C. 1995. The solar neutrino problem. *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* 33:459–503.
5. Ahmad, Q. R., Allen, R. C., Andersen, T. C., Anglin, J. D., Barton, J. C., Beier, E. W., et al. 2002. Direct evidence for neutrino flavor transformation from neutral-current interactions in the Sudbury Neutrino Observatory. *Phys. Rev. Lett.* 89:011301. doi: 10.1103/PhysRevLett.89.011301

פורסם אונליין: 22 ביולי 2024

נערך על ידי: Idan Segev

מנחים מדעיים: Kalee Tock

ציטוט: McDonald A (2024) ניטרינו: חלקיקי הרפאים המרכיבים את היקום שלנו. Front. Young Minds. doi: 10.3389/frym.2022.1034181-he

תורגם והותאם מ: McDonald A (2023) Neutrinos: The Ghost Particles That Make Up Our Universe. Front. Young Minds 10:1034181. doi: 10.3389/frym.2022.1034181

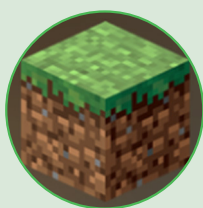
הצהרת ניגוד אינטרסים: המחברים מצהירים כל המחקר נערך בהעדור כי קשר מסחרי או פיננסי שיכול להתפרש כניגוד אינטרסים פוטנציאלי.

זכויות יוצרים © 2023 © McDonald 2024. 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

RYAN, גיל: 15

אני נהנה מאוד לכתוב קוד מחשב, ואוהב קוביות הונגריות. אני גם נהנה מאוד לשחק במיינקראפט.



הכותבים

ART MCDONALD

פרופסור ארט מקדונלד הוא אסטרופיזיקאי קנדי שנולד ב-1943 בסידני, נובה סקוטיה, קנדה – עיר באי קייפ ברטון המונה כיום כ-30,000 תושבים. בסידני הייתה קהילה נפלאה – בטוחה, חברתית ותומכת, והיו בה הרבה מורים מצוינים. פרופ' מקדונלד זוכר במיוחד את מר Bob Chafe, שהיה המורה שלו למתמטיקה. כנער מתבגר, מקדונלד השתייך למועדון שארגן ריקודים קהילתיים בערב שבת, ב-YMCA. שם הוא פגש את אשתו לעתיד, Janet. לפרופ' מקדונלד תארים ראשון ושני בפיזיקה מאוניברסיטת דלהוסי בהליפקס, נובה סקוטיה, קנדה, ותואר שלישי בפיזיקה מהמכון הטכנולוגי של קליפורניה (Caltech) בפסדינה, קליפורניה, ארה"ב. בסיום לימודי הדוקטורט קיבל משרת מחקר במעבדות האטומיות של Chalk River של החברה לאנרגיה אטומית של קנדה (AECL). שם הוא עסק במחקר בסיסי במתקן מאיץ החלקיקים. ב-1982 פרופ' מקדונלד עבר לאוניברסיטת פרינסטון בניו ג'רזי ארה"ב, והתמנה בה לפרופסור. במהלך שנות ה-80 של המאה הקודמת הצטרף לפרויקט בניית מצפה חלקיקי הנייטרינו בסדברי (SNO) באונטריו, קנדה, במטרה לחקור את בעיית חלקיקי הנייטרינו הסולאריים. ב-1989 התמנה לפרופסור באוניברסיטת קווינס בקינגסטון, אונטריו, קנדה, וכן למנהל מתקן ה-SNO. ב-1999 מצפה ה-SNO החל במדידת חלקיקי נייטרינו. הממצאים שהתקבלו הובילו את פרופ' מקדונלד ואת צוותו למסקנה כי חלקיקי הנייטרינו משנים את 'טעמיהם', מה שמרמז על כך שיש להם גם מָסָה סופית. מסקנות אלו סתרו את תחזיות המודל הסטנדרטי. במהלך הקריירה שלו, פרופ' מקדונלד זכה בשורה של פרסים בכללם מדליית בנג'מין פרנקלין (2007); מדליית הנרי מרשל טורי (2011); פרס נובל בפיזיקה (2015) ופרס פריצת הדרך בפיזיקה יסודית (2016). כיום, פרופ' מקדונלד הוא פרופסור אמריטוס באוניברסיטת קווינס בקנדה. הוא ממשיך לפעול בתחום המחקר הבסיסי של חלקיקי הנייטרינו ושל חומר אפל. באביב 2020, במהלך מגפת הקורונה, מקדונלד היה אחד ממובילי פרויקט לייצור המוני של מכונות הנשמה מכניות בעלות נמוכה, שלא היו

זמינות באותה תקופה. לפרופ' מקדונלד ולאשתו ארבעה ילדים ותשעה נכדים, המסיבים להם שמחה רבה. [*art@snolab.ca](mailto:art@snolab.ca)

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



קרן פשפחת
שעשוע
Shashua Family Foundation

נספח

סקירה כללית: הניסוי במצפה חלקיקי הנייטרינו בסדברי

הניסוי שנערך ב-SNO למדידת חלקיקי הנייטרינו ו'טעמיהם', היה מאמץ משותף עצום. בכל רגע נתון, יותר מ-150 אנשים עסקו בניסוי, כאשר כל אחד מהם היה אחראי על חלק מסוים. ראשית, היה עלינו לחפור חלל ענק, בעומק של 2 קילומטרים מתחת לפני האדמה במכרה נטוש בסדברי, קנדה. צוות הבנייה נדרש לקדוח חורים ברצפת המערה, ולמקם שם חומרי נפץ. אז, היה על חברי הצוות להוציא את כל הציוד שלהם מהחלל, לפוצץ את חומרי הנפץ כדי להעמיק את החלל ולהרחיבו, ולפנות את החצץ שנוצר מהפיצוץ. נדרשו כשנתיים וחצי ושמונה מחזורים של פיצוצים כדי ליצור את החלל הזה, שגובהו 34 מטרים (גובה של גורד שחקים בן עשר קומות), ורוחבו 22 מטרים.

איור נספח 1

צוות הבנייה ממקם את חומרי הנפץ כדי ליצור את החלל שיועד ל-SNO.



איור נספח 1

אחרי שיצרנו את החלל, היה עלינו לבנות את כדור האקריליק שיועד להכיל את המים הכבדים. בנינו אותו מ-120 חלקים שגודל כל אחד מהם קטן דיו כדי שנוכל להוריד אותם במעלית לתוך המכרה.

אז הצטרכנו לבנות כדור גאודזי (קשור לגיאומטריה של משטחים שאינם מישוריים) סביב כדור האקריליק. זאת במטרה למקם בו את חיישני האור שימדדו את השפעות התגובה בין חלקיקי הנייטרינו למים הכבדים. השתמשנו במעליות כדי להתקין עשרת אלפים חיישני אור על הכדור הגיאודזי.

בסופו של דבר, מילאנו את כדור האקריליק באלף טונות של מים כבדים טהורים (D_2O). המים היו כה טהורים, שאירעה פחות מדעיכה רדיואקטיבית ספונטנית אחת ליום לטונה של מים – כלומר מים אלה היו טהורים פי מיליארד ממי ברז. אפילו עם כמות כה גדולה של מים כבדים טהורים, הצלחנו למדוד את ההשפעה של נייטרינו בודד בלבד המגיע מהשמש בכל שעה, כיוון שהאינטראקציה של חלקיקי הנייטרינו עם חומר היא נדירה.

איור נספח 2

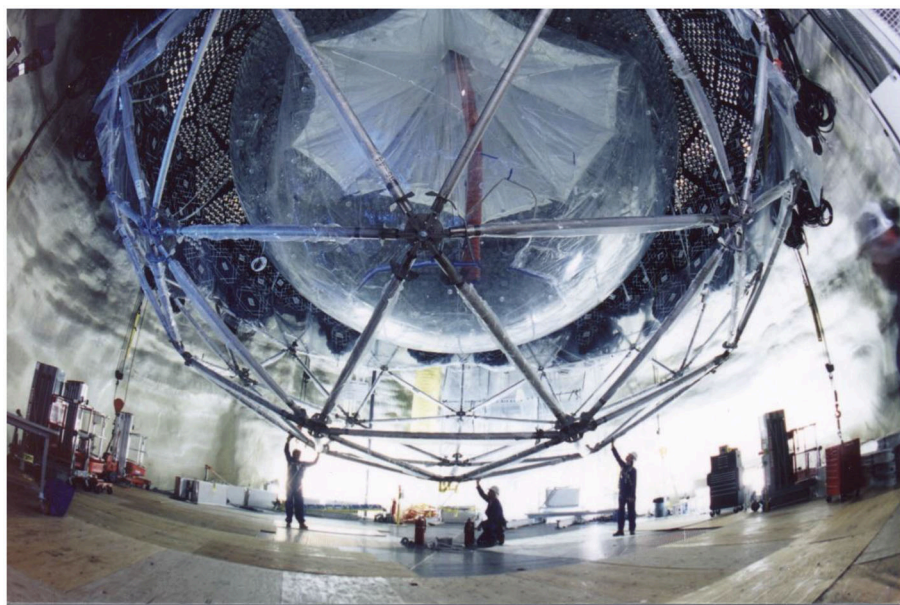
התקנת 60 החלקים העליונים (מתוך 120), של כדור האקריליק שיועד להכיל את המים הכבדים.



איור נספח 2

איור נספח 3

בניית הכיפה הגיאודזית סביב כדור האקריליק, לפני התקנת חיישני האור שיועדו לזהות את חלקיקי הנייטרינו.

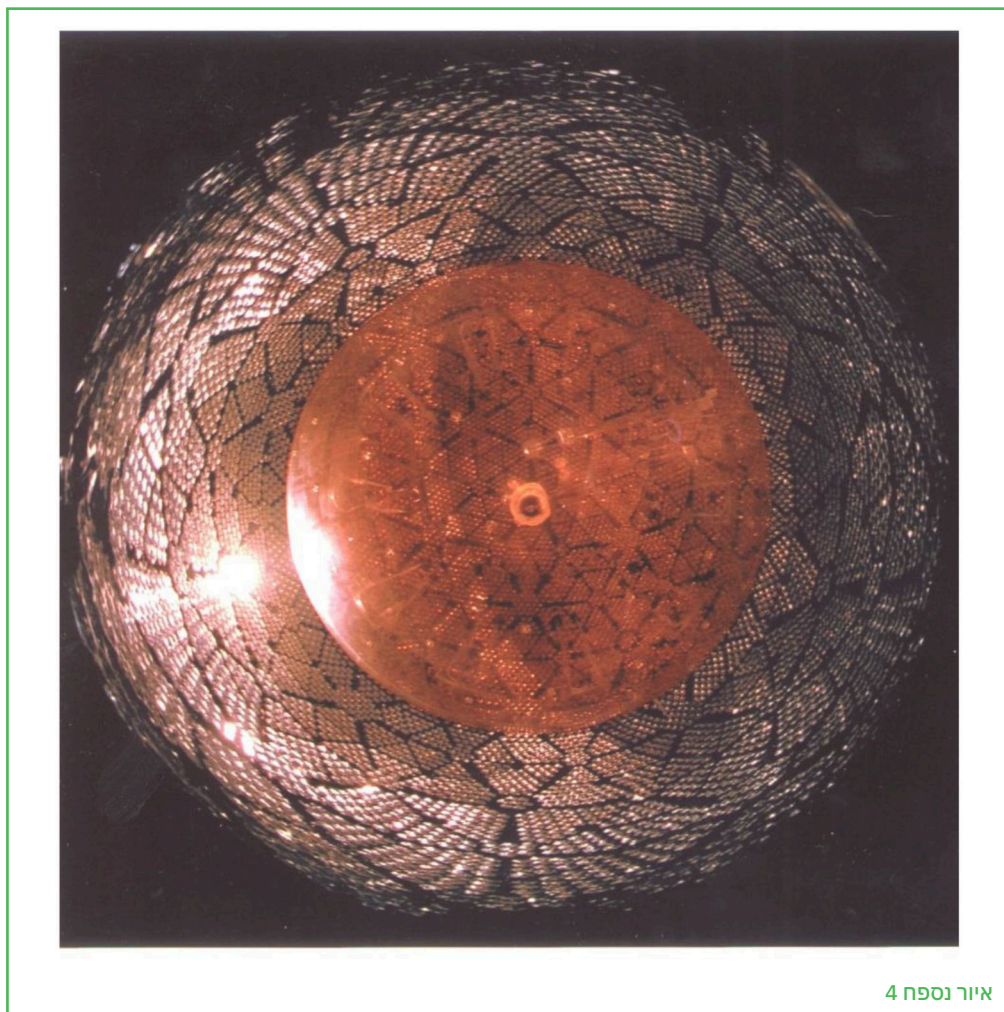


איור נספח 3

כפי שתוכלו להתרשם, פרויקט זה זָמַן אתגר הנדסי מורכב לצד ניסוי בפיזיקה יסודית. אנשים רבים שלקחו חלק בפרויקט הפגינו מקצועיות ומסירות, ושיתפו פעולה כדי להגשים מטרה משותפת בעלת משמעות, לתחושתם. במקרים רבים נדרשנו לבחור איך לבצע חלק כלשהו בניסוי. כדי לעשות זאת הצגנו זה לזה את הפתרונות החלופיים בצורה מפורטת, עד שהתבהר איזו דרך הקבוצה העדיפה על פני הדרכים האחרות. למרבה המזל, לאחר שקיימנו דיונים מעמיקים, הצלחנו להגיע להסכמות. העבודה המשותפת והתקשורת הטובה בין העמיתים הניבו הצלחה גדולה, ובעקבותיהן גילינו דבר חדש ומשמעותי על אודות אבני הבניין היסודיות של היקום שלנו.

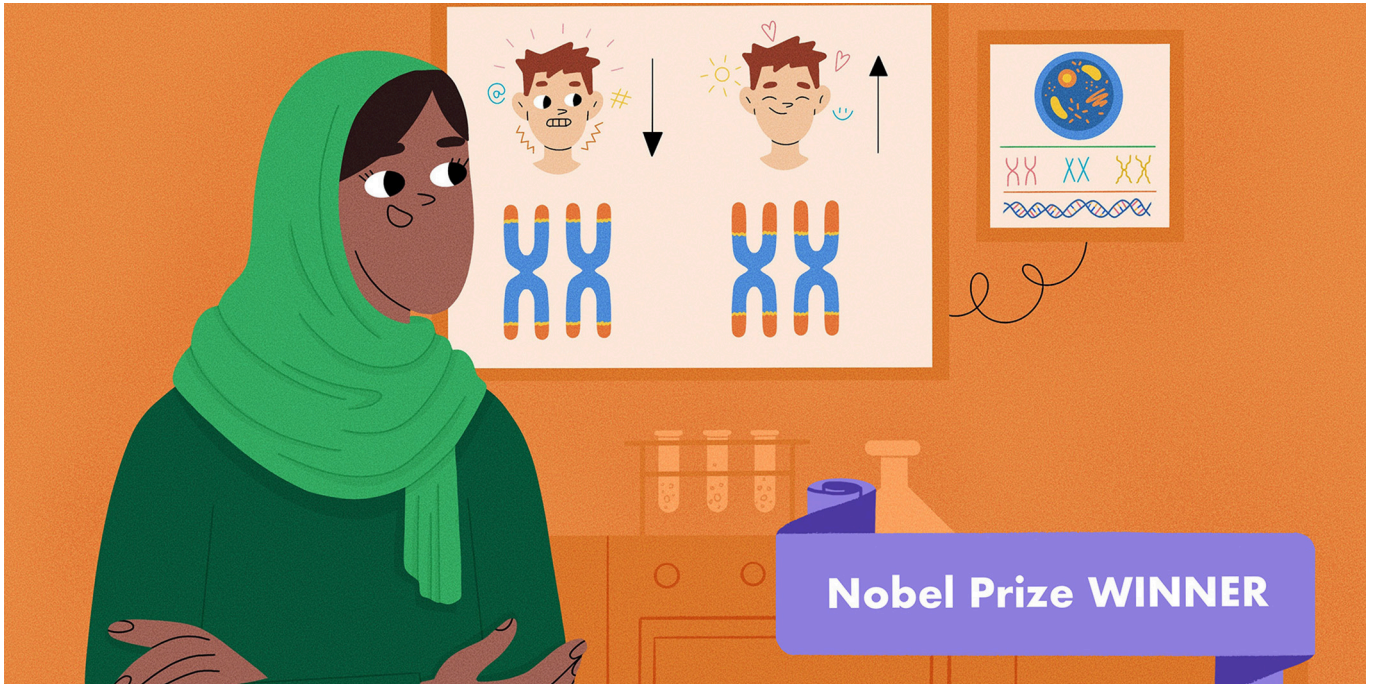
איור נספח 4

צילום בעדשה רחבה
המכונת כלפי מעלה.



איור נספח 4

בצילום ניתן לראות את חלקו התחתון של כדור האקריליק (אדום), המוקף עשרת אלפים חיישני אור ששימשו לזיהוי נוכחות חלקיקי הנייטרינו.

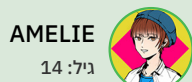


כוח הַטְלוֹמֶרִים: איך לחיות חיים ארוכים יותר ובריאים יותר

Elizabeth Blackburn*

המחלקה לבייכמיה ולביופיזיקה, אוניברסיטת קליפורניה, סן פרנסיסקו, סן פרנסיסקו, קליפורניה, ארה"ב

סוקרים צעירים



האם ידעתם כי ההחלטות שאתם מקבלים בחיי היומיום, כמו באיזו מידה אתם עוסקים בפעילות גופנית; מה אתם אוכלים; ואפילו הדרך שבה אתם חושבים, יכולות לשנות את היחידות הבסיסיות המצויות בתאי הגוף? במאמר זה, אספר לכם על אודות הַטְלוֹמֶרִים. אלו הם הקצוות המגינים של מולקולות הדנ"א – המולקולות המאחסנות את הַנְּגִינִים של כל אורגניזם. אציג בפניכם גם אַנְזִיִּים שגילינו, בשם טְלוֹמֶרַאז, האחראי על הוספת הטלומרים ועל תחזוקתם. לאחר שנצלול לפרטים המולקולריים של הטלומרים ושל הטלומראזים, אחשוף בפניכם כמה קשרים מעניינים מאוד בין הטלומרים לבריאות האדם. אני מקווה כי עד לסיום קריאת המאמר, גם אתם תתרשמו כי הדרך שבה הגורמים הפסיכולוגיים, הסביבתיים והחברתיים יכולים להשפיע על יסודות הביולוגיה שלנו – היא ללא ספק מדהימה.

הפרופסורית אליזבת בֶּלְקֶבֶרן זכתה בפרס נובל לפיזיולוגיה או לרפואה לשנת 2009, במשותף עם הפרופסורית קרול גְרִיִּידר והפרופסור ג'ק שוֹסְטֶק, עבור הגילוי כיצד הטלומרים מגינים על הכרומוזומים, ועל גילוי האנזים טלומראז.

הקצוות המגינים של הדניא

החיים, על מורכבותם הרבה, הם חידה עצומה. אנשים סקרנים, כמוכם וכמוני, נוטים לשאול שאלות כמו 'מה זה?' 'מה מתרחש כאן?', ו'מדוע זה קורה כך?'. בחרתי לתעל את הסקרנות הבלתי נדלית הזו למחקר בתחום הביולוגיה – מדעי החיים. היות שביולוגיה היא דבר כה מורכב, עליכם לשאול את עצמכם תמיד: מָהם הדברים שבאפשרותי להבין, ובמה עליי למקד את המחקר שלי? אחרת, כל פרטי התופעות הביולוגיות שאתם חוקרים עלולים להציף אתכם ברגע. אחד מנתיבי המחקר שאתם עשויים לבחור בתחום הביולוגיה מכונה ביולוגיה מולקולרית. במסגרת תחום זה אנו בוחנים תהליכים ביולוגיים באמצעות מחקר המולקולות השונות ויחסי הגומלין ביניהן. עבורי, הביולוגיה המולקולרית היא תחום מדעי מספק מאוד, כיוון שבמובנים רבים היא מאפשרת לנו לענות על שאלות פרטניות ובסיסיות הנוגעות לתעלומות החיים. במאמר זה אספר לכם לגבי התגליות שאליהן הגענו באמצעות הביולוגיה המולקולרית. על אודות מנגנון ההגנה החשוב המצוי בקצוות מולקולות הדניא – המולקולות המכילות את ההוראות הגנטיות (הקוד) המועברות מהורים לילדיהם. אך ראשית, עלינו להניח את היסודות שלנו.

דניא, כרומוזומים ושכפול

כל תא חי מכיל מבנים בשם **כרומוזומים**. כל כרומוזום מכיל פולימר (מולקולה גדולה מאוד) בשם חומצה דאוקסיריבונוקלאית, או בקיצור, **דניא**. יחד, כל הדניא הוא כמו ספרייה של הוראות המנחה את התא עצמו, וכל אורגניזם הבנוי מתאים כאלו, איך לתפקד. מולקולת הדניא היא בצורת סליל כפול המורכב משני גידילים לינאריים (קוויים). הגדילים הללו מקבילים זה לזה ומסתלסלים זה סביב זה, כך שהם יוצרים את מבנה הסליל הכפול (איור 1). בכרומוזומים, הדניא מגולגל ודחוס בצפיפות בתוך התאים (איור 1). בתאים של בני אדם, לדוגמה, ישנם 23 זוגות של כרומוזומים המכילים את כל הדניא שלנו. הכרומוזומים הללו ממוקמים בגרעין התא ומכונים **כרומוזומים לינאריים**, כיוון שלכל אחד מהם יש שני קצוות. זה נכון עבור כל התאים האיקריוטיים, שהם תאים בעלי גרעין. אורגניזמים בעלי תאים המכילים גרעין כוללים את כל החיות, הצמחים והפטירות, וכן את רוב האצות. מנגד, אורגניזמים שבתאיהם אין גרעין מכונים **פרוקריוטיים** (חיידקים למשל), ולהם **כרומוזומים עגולים** ללא קצוות (צורה דמוית מעגל).

כשהתאים מתחלקים עליהם לשכפל את הדניא שבתוכם, כדי שגם התאים החדשים יכלו את כל ההוראות הנחוצות המאוחסנות בדניא. כפי שאתם אולי כבר יודעים, פולימר הדניא הוא חוט המורכב מארבעה סוגי כימיקלים המהווים את אבני הבניין שלו. הם מכונים בסיסים, ומסומנים בארבע אותיות – G, T, A, C – שמייצגות את ארבעת הכימיקלים (A – אַדנין; T – תימין; G – גואנין ו-C – ציטוזין). רצף הבסיסים הללו לאורך פולימר הדניא יוצר את הקוד המשמש כהוראות הפעלה של התא. בשני הגדילים המרכיבים את הסליל הכפול, הבסיסים הללו תמיד מופיעים בזוגות: A-T ו-C-G, כך שמול כל בסיס A בגדיל אחד של הסליל הכפול ניצב בסיס T בסליל האחר, מול בסיס G ניצב בסיס C, ולהפך (איור 1).

כאשר תהליך השכפול מתרחש בגרעין התא, המנגנונים המולקולריים המורכבים מפרידים תחילה את הסליל הכפול לשני גדילי דניא נפרדים. אז, כל סליל מקורי משמש כתבנית

כרומוזום (Chromosome)

מבנה של דניא הדחוס בצפיפות בתוך תאים.

דניא (DNA)

המולקולה הנושאת את המידע על אודות נראותם של אורגניזמים חיים, ותפקודם.

איקריוטיים (Eukaryotes)

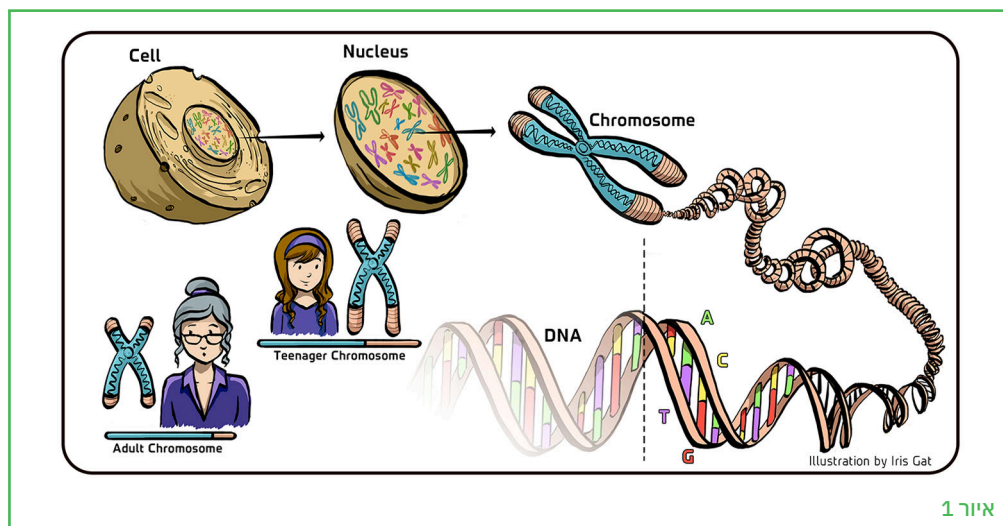
אורגניזמים שתאיהם מכילים גרעין.

פרוקריוטיים (Prokaryotes)

אורגניזמים שתאיהם אינם מכילים גרעין.

איור 1

דנ"א וכרומוזומים בתאים איקרוטיים. באיקרוטיים, הדנ"א (DNA) מאוחסן בגרעין התא (Nucleus), שבו הוא מגולגל ודחוס במבנים המכונים כרומוזומים (Chromosomes). הדנ"א מופיע בצורת סליל כפול המורכב מארבעה בסיסים מסומנים בארבעה צבעים (C-I G, T, A). באיור, הם המרכיבים את הדנ"א. כאשר התאים (Cells) משתכפלים מתרחשת העתקה של הדנ"א, שבה נוצרים שני סלילים כפולים חדשים מהסליל הכפול המקורי. המנגנון המולקולרי שמעתיק את הדנ"א אינו מעתיק את רצף הדנ"א בקצה הכרומוזום (החלק השקוף של הדנ"א שמופיע בתחתית האיור). כתוצאה מכך, הדנ"א מתקצר ככל שאנו מתבגרים (ראו החלק השמאלי בתחתית האיור). כדי להבטיח תורשה יציבה של החומר הגנטי יש צורך במנגנון מיוחד להגנה על קצוות רצף הדנ"א במהלך השכפול. מקרא: = Teenager Chromosome כרומוזום של בן/בת נוער = Adult Chromosome כרומוזום של אדם מבוגר.



איור 1

לסינתזה (מיזוג) עם הגדיל המתאים לו. בתהליך זה, לכל בסיס בכל גדיל (שבשלב זה הוא כבר נפרד), 'משודך' הבסיס המתאים לו בזוג (A משלים את T, ו-T את C. A משלים את G, ו-G את C), עד שנוצר סליל חדש ומשלים עבור כל אחד מגדילי הדנ"א המקורי. בסיום התהליך מתקבלים שני סלילים כפולים חדשים, שהם לדנ"א המקורי.

עד כאן, הכול מובן – יש לנו סליל דנ"א כפול חדש, מוכן לשימוש בתא האיקרוטי החדש שנוצר לאחר חלוקת התא. אולם מסתבר כי המנגנון המורכב הזה לא יכול להעתיק את גדילי הדנ"א ממש עד קצותיהם (איור 1). לכן בתהליך חלוקת התא לא מתרחשת העתקה של רצף זוגות הבסיסים המצויים בסוף כל גדיל דנ"א. כלומר, בעקבות כל שכפול הדנ"א המקורי מתקצר עוד ועוד.

כאן ודאי תתעורר במוחותיכם הסקרנים השאלה – ובכן, מדוע זה קורה? למה הדנ"א לא משתכפל במלואו במהלך חלוקת התא? למען האמת, איננו יודעים ממש. זו אחת מאותן דוגמאות שבהן הביולוגים מרגישים כמו ארכיאולוגים – מנסים לפענח את התפתחות האירועים ההיסטוריים באמצעות פיסות מידע מהפריטים ששרדו עד ימינו אלה. אנו יודעים רק שלא מתרחשת העתקה מלאה של הדנ"א במהלך חלוקת התאים. אנו גם מסיקים כי התאים הראשונים באבולוציית החיים היו תאים פרוקרוטיים (ולא איקרוטיים), כלומר בעלי כרומוזומים מעגליים, כך שלדנ"א לא היו קצוות חופשיים, וכי התאים האיקרוטיים בעלי הדנ"א הליניארי – ומכאן גם קצוות הדנ"א – התפתחו בשלב מאוחר יותר של האבולוציה.

קו המחשבה הזה הביא אותנו לשיער כי מנגנון שכפול הדנ"א הפועל באיקרוטיים התפתח במקור בפרוקרוטיים. שם הוא פעל בצורה מספיק טובה, ולא נאלץ להתמודד עם קצוות הדנ"א, כיוון שלדנ"א מעגלי אין קצוות! האם המשמעות היא כי במקרה של כרומוזומים ליניאריים בתאים איקרוטיים, בכל פעם שהתא משכפל את הדנ"א שלו חלק מהחומר הגנטי החשוב שנושא את הקוד ומצוי בדנ"א אובד? למרבה המזל, זה לא מה שקורה, הודות למנגנון הגנה המוודא כי לא יאבד אף חלק מהדנ"א, שחשוב לתפקודו הפקין בתאים האיקרוטיים.

הטלומרים – מגיני הדניא

כפי שראינו בחלק הקודם של המאמר (איור 1), באיקריוטים, שכפול הדניא אינו מגיע עד לקצות גדילי הדניא. אם היו שואלים אתכם איך להגן על החומר החשוב המקודד במקטע הסופי של הדניא, האם יכולתם לחשוב על פתרון לחידה הזו? מסתבר כי בסופם של כרומוזומים ליניאריים ישנם רצפי דניא מיוחדים בשם **טלומרים** (ביונית, משמעות המילה 'טלו' היא סוף, ומשמעות המילה 'מר' – חלק). הדניא בטלומרים נקרא 'דניא לא מקודד', ותפקידו להבטיח כי החלק המקודד של הדניא (הכולל את ההוראות שההורים מעבירים לצאצאיהם), יועבר באופן תקין לדור הבא.

תוכלו לחשוב על הטלומרים כעל קצוות הפלסטיק המגוננים שבסוף שרוכי הנעליים. בפעל, הטלומרים מפצים על כך שלא מתרחשת העתקה של הדניא שבקצות הכרומוזומים. למה הכוונה? כדי להימנע ממקרים שבהם חלקים חשובים (מקודדים) בקצות הדניא לא יועתקו במהלך חלוקת התא, כשישנם טלומרים ממש בקצות הכרומוזומים, רק הם החלקים שלא מועתקים עד סופם, וכך חלקים בעלי חשיבות (מקודדים) של חומר הדניא אינם הולכים לאיבוד. אם נדמה זאת לשרוכי נעליים – כשמשתמשים בשרוכים לאורך זמן, קצוות הפלסטיק שלהם הולכים ומתבלים, אך השרוכים עצמם נשארים מוגנים. גילינו דבר אפילו יותר מלהיב – כאשר הטלומר מתקצר, ישנו **אנזים** מיוחד שנמשך אליו, שביכולתו להוסיף עוד דניא טלומרי לכרומוזום. כך, הטלומר יכול להתחדש. זהו פתרון יפהפה שהטבע מצא לבעיית אי השלמת שכפול הדניא בקצות הכרומוזומים הליניאריים.

ב-1930, הגנטיקאים האמריקאיים הרמן מולר [1] וברברה מקלינטוק [2] זיהו את הטלומרים כ'משהו' מיוחד בסוף הכרומוזומים, שהגן על קצותיהם. בהמשך, עם התפתחות הביולוגיה המולקולרית, היה ניתן לאפיין את טבעם המולקולרי של הטלומרים. ב-1978, הביולוג האמריקאי ג'וזף גול ואני זיהינו את מבנה הטלומרים בקצות הכרומוזומים הליניאריים באורגניזם מעניין בשם *Tetrahymena thermophila* (להלן: טטרהימנה, בתעתיק לעברית), הנפוץ ברקת המצויה על פני השטח של מאגרי מים [3]. מצאנו כי הטלומרים של האורגניזם הזה מורכבים מדפוס מסוים של בסיסי דניא – הרצף TTGGGG (איור 2), שחזר על עצמו מספר שונה של פעמים (בין 20-50) בכרומוזומים שונים בתוך אוכלוסיית התאים. זמן לא רב לאחר מכן התגלו דפוסים חזרתיים דומים בטלומרים של אורגניזמים אחרים, כמו אוקסיטרִיכה רִיסִינית (*ciliate Oxytricha*) – TTTTGGGG, וברִינִית – TTAGGG [4]. טלומרים אנושיים מכילים את הרצף TTAGGG, שחוזר על עצמו אלפי פעמים בסופי כל הכרומוזומים שלנו [4].

בנקודה זו, יכולות לעלות הרבה שאלות מעניינות על אודות הטלומרים והדפוסים החוזרים שלהם. הייתי רוצה להתמקד כעת בשאלה זו: כיצד הטלומרים מתווספים לקצוות הכרומוזומים? האם מנגנון זה מספק הגנה במצבים אחרים, נוסף על חלוקת התא? בהמשך המאמר נתבונן במנגנון המופלא שבונה את הטלומרים, ונראה מה הם יכולים ללמד אותנו על אודות בריאות בני האדם ולגבי רווחתנו.

טלומר (Telomere)

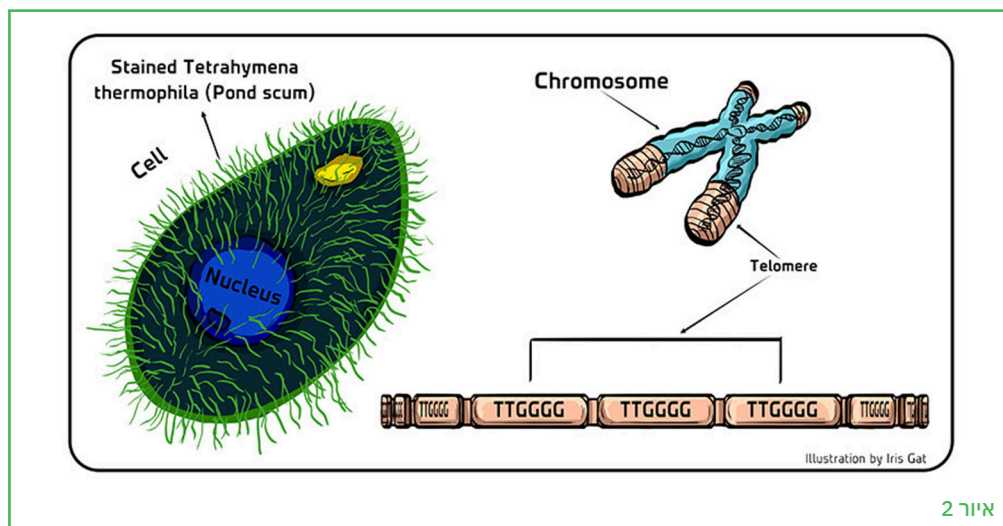
רצף דניא 'מגן' (כמו סוג של פקק), המופיע בסופיהם של כרומוזומים ליניאריים.

אנזימים (Enzymes)

מבני חלבונים שמעצמים את הפעילות הכימית המתרחשת בתאים חיים.

איור 2

טלומרים המצויים בירוקת מאגרי מים. צד שמאל: איור של האורגניזם האיקריוטי החד-תאי טטרהימנה, החי במים מתוקים. מאות האברונים דמויי השערות (ריסונים) על פני השטח של התא (Cell) פועלים כמְשׁוּטֵים זעירים המאפשרים לאורגניזם לנוע במים, לצוד מזון או להזדווג. צד ימין: טלומרים הם כמו קצוות הפלסטיק המגינים בשרוכי הנעליים. הם שומרים על החומר הגנטי המאוחסן בחלק המקודד של הדנ"א (חלק הכרומוזום הצבוע בכחול). החלק הטלומרי (לא מקודד) של הדנ"א (חלק הכרומוזום הצבוע בחום) מורכב מיחידות חוזרות של בסיסים (TTGGGG) בטטרהימנה; TTAGGG בננו, בני האדם).
 Stained = צבוע
 Nucleus = גרעין.



איור 2

מארכים את חיי הטטרהימנה – גילוי הטלומראז

כשחקרתי את הטטרהימנה ואת הזנים הקשורים לה, בשנות ה-80 המוקדמות של המאה הקודמת, היה ידוע כי במהלך מחזור חיי הטטרהימנה, יש שלב שבו הכרומוזומים המקוריים נחתכים לכרומוזומים ליניאריים קטנים, המכונים מיני-כרומוזומים. גם הם, כמו הכרומוזומים השלמים שעליהם דיברנו קודם לכן, מסתיימים בחזרות של דפוס רצפי הדנ"א הטלומרי – TTGGGG. כשגילינו את המבנה של חזרות הדנ"א האלה בתאי ירוקת במאגרי מים, ניסינו לבדוק אם הוא תואם את הידע שהיה בידינו באותה תקופה בנוגע להתווספות בסיסי דנ"א לכרומוזומים. המנגונים היחידים בתחום שהיו מוכרים לנו באותו זמן היו (i) שכפול דנ"א, ו(ii) שְחִלּוּף דנ"א. לכל אחד מהמנגונים הללו היו מערכי חוקים מסוימים מאוד לתוספת דנ"א. הופעת רצפי הטלומרים החזרתיים שגילינו (למשל, לאור העובדה שהטלומרים של הירוקת המצויה במאגרי מים לא היו אחידים באורכם – לפעמים הכילו מספר מועט של חזרות; לעיתים מספר רב; ולפעמים כל הטלומרים התארכו בבת אחת) סתרה את הידע הקודם שהיה ברשותנו על אודות מערכי החוקים הללו. הופתענו לגלות את ההתנהגויות האלה כיוון שהממצאים החדשים שלנו לגבי מבנה הטלומרים לא תאמו את העקרונות והידע המבוססים היחידים שהיו לנו בזמנו על אודות דנ"א.

כשניצבים בפני צמתים יוצאי דופן שכאלה במדע, צריך לחשוב 'מחוץ לקופסה' ולשקול אפשרויות יצירתיות אחרות כדי למצוא את התשובה שמחפשים. במקרה הזה, ניסיתי לשער איזה מנגון יכול להיות אחראי לתוספת רצפי הטלומרים החזרתיים למיני-כרומוזומים לאחר שהם נפרדים מהכרומוזומים הארוכים. אחת האפשרויות הייתה פעילות של אנזים. כדי לבדוק את ההשערה הזו, שמתי במבחנת המחקר תמצית של תאי ירוקת המצויה במאגרי מים, והוספתי כימיקלים שונים כדי לראות אם אחד מהם נָרָם להוספה של טלומרים למיני-כרומוזומים. לאחר תהליך של ניסוי וטעייה, גיליתי כי אחת התוספות אכן האיצה סינתזה של רצפי טלומרים חזרתיים.

בשלב הזה, קרול גְרִיִּיִּד, כיום פרופסורית, הצטרפה למעבדה שלי במסגרת לימודי הדוקטורט שלה. האתגר שניצב בפניה היה לפשט את התגובה במבחנת המחקר, כדי שנוכל לגלות את פעילות האנזים המסוימת האחראית לתוספת הטלומרים בקצוות. לאחר ניסוי

וטעייה נוספים קרול צמצמה ופישטה את הבדיקה עד כמה שניתן. הוספנו רצפים חזרתיים של TTGGGG שיצרנו במעבדה, מייד לאחר שהכרומוזומים נחתכו למיני-כרומוזומים. בשלב זה ציינו שהטלומרים יתווספו. הוספנו את אבני הבניין של הדנ"א למבחנה (שתי מולקולות בשם dGTP ו-TTP), עם מעט מגנזיום גופרתי. ראינו כי רצפי החזרות של ה-TTGGGG אכן נוספו לקצוות הדנ"א שיצרנו במעבדה [5]. משמעות הדבר הייתה שמצאנו מנגנון אפשרי להארכת טלומרים! עמיתתה של קרול, תלמידת התואר השני Claire Wyman, המציאה שם לאנזים החדש, שנראה כאחראי לתוספת רצפי הטלומרים החזרתיים: **טלומראז** [6].

טלומראז (Telomerase)

אנזים המוסיף דנ"א
טלומרי לכרומוזומים.

רנ"א (RNA)

עותק נייד של דנ"א המשמש
את התא לביצוע פעולות
שונות, כמו שֶׁכָּפֹּל דנ"א.

כדי לְמַקֵּף את השערותנו בנוגע לתפקידו של הטלומראז בהארכת הדנ"א בתאים חיים (ולא רק במבחנת מחקר), ביצענו כמה ניסויים נוספים. לא אכנס כאן לפרטים, אך גילינו כי לאנזים הטלומראז יש חלק של **רנ"א**, המכיל רצף קצר המשלים את רצף הדנ"א של הטלומרים. הרנ"א הזה פועל כתבנית לרצף הטלומרי המשלים המתווסף לכרומוזום. בכמה מהניסויים הללו שינינו (במילים אחרות, הנדסנו) את מבנה הטלומראז כדי לבחון אם השינויים השפיעו על יכולתו לסַנְתֵז את רצף הדנ"א הטלומרי, ולהאריך את הטלומרים. היו גרסאות מהונדסות שאפשרו לטלומראז להמשיך לפעול, אך הכילו שינוי בתבנית הרנ"א שאחראית על הוספת רצפי הדנ"א הטלומרי. בגרסאות הללו מצאנו כי בתאי הירוקת המצויה במאגרי מים היו חזרות חלופיות של רצפי הטלומרים – שונות מהרצף החוזר המקורי, TTGGGG, ומשלימות לשינוי הבסיסים ששִׁמְנו בתבנית [7].

חשוב לציין שכאשר הִנְדַסְנו את הטלומראז כך שלא יתפקד כלל, הטלומרים של תאי ירוקת מאגרי מים המשיכו להתקצר עוד ועוד עם כל חלוקה של התא, ולבסוף, לאחר 20-25 חלוקות, התא הפסיק להתחלק ומת [7] (**איור 3**, צד שמאל). כלומר, כאשר פעולת הטלומראז ניזוקה, תאי הירוקת המצויה במאגרי מים, שבאופן רגיל לא מתים (לכאורה אלה תאים שמתחלקים לְנִצְחָה), הפכו לבני תמותה (כלומר, הפסיקו להתחלק אחרי מספר מסוים של חלוקות). כל הממצאים הללו הובילו למסקנה שלפיה הטלומראז אכן אחראי להוספת הדנ"א הטלומרי לקצוות הכרומוזומים הליניאריים. זו הייתה התגלית שזיכתה את קרול ואותי בפרס נובל לפיזיולוגיה או לרפואה לשנת 2009 (במשותף עם עמית נוסף, פרופ' ג'ק שוֹסְטֵק, שעמו חקרתי את תפקודי הטלומרים בתאים של שֶׁמֶר האפיייה). חשוב לציין שבהמשך, לאחר גילוי הטלומראז, התגלה כי פעילותו חשובה במקרים נוספים פרט לחלוקת תאים. הסתבר שדנ"א טלומרי רגיש מבחינה כימית לנזק גם בתוך תאים, ולכן מצריך תיקון במצבים שונים – במיוחד לאורך תקופות ארוכות, כמו במהלך חיי בני האדם. מסיבה זו, הטלומראז חשוב גם בתאים שלא מתחלקים (**איור 3**, צד ימין).

כעת, משהתוודעתם לעבודתי בתחום הטלומרים והטלומראז, אני רוצה להציג בפניכם נתיב מחקר נוסף שהתפתח בשלב מאוחר יותר של הקריירה המדעית שלי. נתיב מחקר זה הצביע על הֶקְשֶׁר שבין הטלומרים לבריאות האדם, בכמה דרכים מפתיעות מאוד.

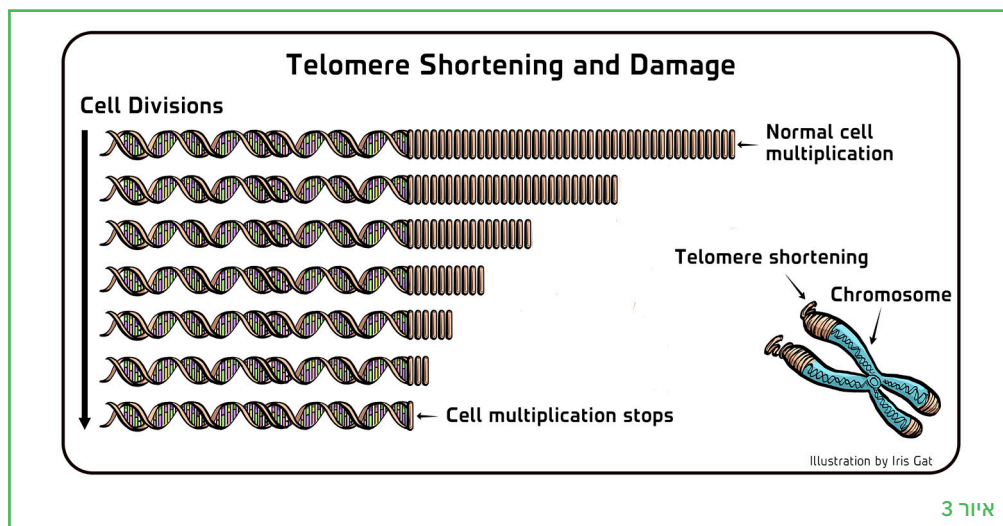
שיעורים מהטלומרים – דרכים לשיפור בריאות האדם

כשחקרתי את תחזוקת הטלומרים ואת הטלומראז בתאים אנושיים באוניברסיטת קליפורניה, סן פרנסיסקו (UCSF), פנתה אליי חוקרת צעירה ומבריקה בתחום הפסיכולוגיה בשם אֵלִיֶסָה אֶפֶל. אליסה, כיום פרופסורית במחלקה לפסיכיאטריה באוניברסיטת

איור 3

התקצרות טלומרים ונזק שנגרם להם. צד שמאל:

כאשר מתקיימת פעילות בלתי תקינה של הטלומראז בתאי ירוקת המצויה במאגרי מים, הדנ"א הטלומרי (המוצג כחלק הימני החוזר באיור זה), מתקצר עוד ועוד עם כל חלוקה של התא. כאשר הטלומרים נהיים קצרים מדי, התא מפסיק להתחלק. הדבר נכון גם עבור תאים אנושיים. **צד ימין:** הקצוות המורכבים מטלומרים רגישים מבחינה כימית לנזק בתוך התאים. לכן, פעילות הטלומראז חשובה גם לתחזוקת הטלומרים בתאים שאינם מתחלקים. מקרא: = Cell divisions חלוקת תאים Normal cell multiplication = שכפול תאים רגיל = Telomere shortening התקצרות טלומר = Cell multiplication stops שכפול התא מפסיק.



קליפורניה, סן פרנסיסקו, חקרה אז במסגרת לימודי הפוסט-דוקטורט שלה לחץ נפשי מתמשך חמור. באותו זמן, בתחילת שנות ה-2000, היה ידוע כי אנשים הסובלים מלחץ נפשי מתמשך חמור לעיתים קרובות מראים שינויים גופניים המחקים תהליכים המאפיינים הזדקנות טבעית של בני אדם, אך בקצב מהיר יותר. במילים אחרות, ראינו קשר בין לחץ נפשי מתמשך להזדקנות מואצת בקרב בני אדם. מנקודת מבט אחרת, כשחקרנו את הטלומרים הבנו כי אם משנים גנטית את הטלומראז של תאי ירוקת במאגרי מים, או של תאי השֶׁמֶר, כך שיפסיק לפעול, הטלומרים ימשיכו להתקצר עם כל חלוקה. זאת עד שלבסוף הם יהיו קצרים מדי וישלחו אותות לתא להפסיק להתחלק (איור 3). תגלית זו הובילה לרעיון חדש שהחל לצבור תשומת לב ותמיכה בתחום: ייתכן כי התקצרות הטלומרים קשורה להזדקנות של יונקים כמונו. בזמנו, לא היה ברור מה מתרחש בתאי הגוף האנושי במהלך ההזדקנות.

כשאליסה פנתה אליי ושאלה אם ייתכן שישנו קשר בין לחץ נפשי מתמשך להתקצרות הטלומרים, חשבתי שזו שאלה מעניינת מאוד. היא סיפרה לי על אודות מחקר מרתק שהיא עורכת באימהות לילדים המתמודדים עם בעיות התפתחותיות או עם מחלות כרוניות. קבוצת האימהות הזו הייתה נתונה תחת לחץ נפשי מתמשך חמור, בין השאר משום שלעיתים קרובות לא ניתנת תמיכה במצבים כאלו בארה"ב (שבה חיו האימהות וילדיהן, ושבה נערך המחקר). נוסף על העניין המדעי שניצת בי כששמעתי על המחקר של אליסה, וכשתיתי לגבי הקֶשֶׁר שעשוי להתקיים בין ממצאי מחקרה להתקצרות הטלומרים, הייתה לי סיבה נוספת, אישית יותר, לעסוק במחקר הזה. בתקופה ההיא בני עוד היה קטן, ומצאתי שאני דואגת לו לעיתים קרובות למדי. זה גרם לי להרגיש אֶמפֶּתיה רבה כלפי הנשים מהמחקר של אליסה, במיוחד כשהבנתי כמה לחץ נפשי הן עלולות לחוות בתור מטפלות במצבים המאתגרים הללו.

החלטנו להתחיל במחקר ניסיוני, שבו הקבוצה שלי מדדה את פעילות הטלומראז, וקבוצה אחרת מדדה את אורך הטלומרים בתאים של אימהות שהיו המטפלות העיקריות בילדיהן המתמודדים עם מחלות כרוניות. השווינו את הממצאים לאלו של ההורים בקבוצת הביקורת. הורים בקבוצת הביקורת תאמו מכל בחינה להורים בקבוצה הנחקרת, פרט לעובדה שלהורים בקבוצת הביקורת לא היו ילדים המתמודדים עם מחלות כרוניות. את עבודתנו הובילה פוסט-דוקטורנטית בשם Jue Lin. Jue היא חוקרת שעסקה בעבר בטלומרים של

שָׁמְרִים וּבִטְלוֹמֵרָאז, וּמִצָּאָה עֲנִיין בְּנִתִּיב הַמַּחְקֵר הַחֲדָשׁ הַזֶּה. מִיִּיד, כִּבֵּר בַּמַּחְקֵר הָרֵאשׁוֹן, קִיבְּלָנוּ תּוֹצָאָה מִפְּתִיעָה – הֵיִתָּה קוֹרְלִצִּיָּה כְּמוֹתֵיךְ מִשְׁמַעוֹתֵיךְ בֵּין אֹרֶךְ הַטְּלוֹמֵר – בַּמַּקְרָה זֶה, בֵּין אֹרֶכְךָ הַקָּצֵר שֶׁל הַטְּלוֹמֵר – לְנוֹכְחוֹת הַטִּיפּוֹל, וְלִתְחוּשֵׁת הַהוֹרָה הַמִּטְפֵּל שֶׁלִּפְּנֵי הַטִּיפּוֹל גּוֹרֵם לָהֶם לִלְחָץ נִפְשִׁי (אִיּוֹר 4)! הַתּוֹצָאָה הַמְדַהִימָה הַזֹּאת הֵיִתָּה הָאִינְדִּיקָצִיָּה הָרֵאשׁוֹנָה לְכָךְ שֶׁעֲשׂוּיָה לִהְיוֹת הַתְּאֵמָה בֵּין מִצַּב פְּסִיכּוֹלוֹגִי, כְּמוֹ לְחָץ נִפְשִׁי מִתְמַשֵּׁךְ, לְשִׁינוֹי גּוֹפְנִי מוֹבֵהֵק מְאֹד בְּרֵמָה הַמוֹלְקוֹלֵרִית הַבְּסִיסִית בִּיּוֹתֵר!

איור 4

אורך הטלומרים
(Telomere length)
ולחץ (Chronic stress)
מתמשך (Chronic stress).
במחקר שביצענו לראשונה
בהשתתפות אימהות שהיו
המטפלות הראשיות בילדיהן
המתמודדים עם מחלות
כרוניות, מצאנו שהייתה
קורלציה סטטיסטית מובהקת
בין הטלומרים הקצרים
שנמצאו אצל האימהות
למספר השנים שהיו במצב
זה (צד שמאל של האיור), וכן
לרמות הלחץ הנפשי שהן
דיווחו שחוו (צד ימין של
האיור). נלקח
מ- Epel et al. [8].
מקרא:

= Telomere Length

אורך הטלומר

קצר = Short

בינוני = Medium

ארוך = Long

Chronicity of Caregiving

(שנים) = מְשָׁךְ

הטיפול (שנים)

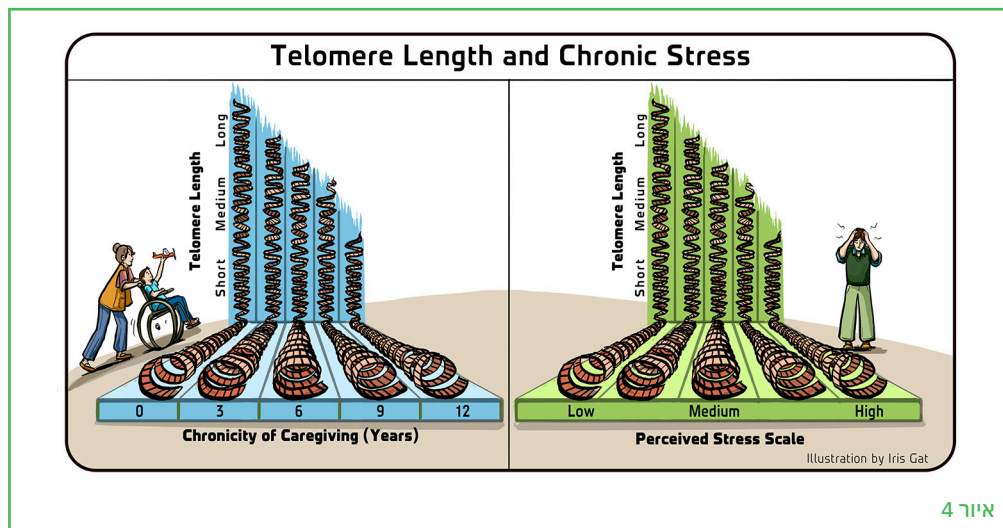
= Perceived Stress Scale

מידת הלחץ הנחווית

נמוך = Low

בינוני = Medium

גבוה = High



איור 4

כַּמְדַּעֲנִים, אִינְנוּ נַחֲפָזִים לְמַסְקִנּוֹת, כִּיּוֹן שֶׁאֵנוּ מוֹדְעִים לְנִטְיָה הָאֲנוּשִׁית לְכַפּוֹת עַל הַמִּצִּיאוֹת וְעַל הַנִּתּוּנִים שֶׁלָנוּ אֶת מָה שֶׁאֵנוּ רוֹצִים לְרֵאוֹת אוּ לְמִצּוֹא. הַמִּשְׁמַעוֹת הַיָּא שֶׁעָלִינוּ לִהְיוֹת חֲשָׁדִים בְּמִיּוֹחַד כִּשֶׁהַתּוֹצָאוֹת הַהִתְחַלְתִּיּוֹת שֶׁאֵנוּ מְקַבְּלִים תּוֹאֲמוֹת אֶת הַהֲשַׁעְרוֹת ה'רְצוּיּוֹת' לָנוּ. מִסִּבֵּה זֶה, הַחֲלָטְנוּ לְנַקּוֹט בְּפַעּוֹלוֹת נוֹסֶפּוֹת כְּדִי לְאִמֵּץ אֶת הַתּוֹצָאוֹת הָרֵאשׁוֹנוֹת שֶׁלָנוּ. אַחַת הַדְּרָכִים הֵיִתָּה לְבַחּוֹן קְבוּצוֹת שׁוֹנוֹת שֶׁל אֲנָשִׁים, הַחוּוִים סוֹגִים דּוֹמִים שֶׁל לְחָץ פְּסִיכּוֹלוֹגִי מִתְמַשֵּׁךְ הַקָּשׁוֹר בְּטִיפּוֹל בְּאַחֲרִים (לְמַשֵּׁל, טִיפּוֹל בְּבֵן מִשְׁפַּחָה הַלוֹקָה בְּדִמְנָצְיָה). בִּיקְשָׁנוּ לְבַדּוֹק אִם הַהֲשַׁפְּעוֹת עַל אֹרֶךְ הַטְּלוֹמֵרִים שֶׁלָהֶם יִהְיוּ זֵהוּת. בַּמַּחְקֵר נוֹסֶף שֶׁעֲרַכְנוּ בְּדַקְנוּ קִשְׁרִים אֲפִשְׁרִים בֵּין אֹרֶךְ הַטְּלוֹמֵרִים לְמִשְׁתַּנִּים אַחֲרִים כְּמוֹ גּוֹרְמִים סְבִיבִיתִים, חִינוּכִים, וְגוֹרְמִים נוֹסֶפִים – נִפְשִׁים אוּ פְּסִיכּוֹלוֹגִים. מִצָּאנוּ קִשְׁרִים רַבִּים כֵּאלּוֹ. הַקְּבוּצָה שְׁלִי וְחוֹקְרִים אַחֲרִים הִגִּיעוּ לְבִסּוֹף לְמַסְקָנָה כִּי יִשְׁנֵם קִשְׁרִים מִשְׁמַעוֹתִים בִּיּוֹתֵר בֵּין אֹרֶךְ הַטְּלוֹמֵרִים לְבִרְיאוֹת הָאָדָם [9].

ב-2017, אליסה ואני כתבנו יחד ספר לקהל הרחב, המציג את ליבית עבודתנו המתמשכת בנושא טלומרים ובריאות האדם, בשם 'The Telomere Effect: A Revolutionary Approach to Living Younger, Healthier, Longer' (ראו בחלק המאמר שכותרתו 'חומרים לחיים צעירים, בריאים וארוכים יותר') [10] (ראו בחלק המאמר שכותרתו 'חומרים נוספים'). על אף שהמוציאים לאור שלנו הם אלו שהתעקשו שנוסיף את המילה 'מהפכנית' לשמו של הספר, הספר אכן מקבץ ומציג מגוון עובדות ומסקנות מעניינות. אני רוצה לחלוק עימכם שתי נקודות חשובות. ראשית, אֶרֶךְ הַחַיִּים וְהַגִּישָׁה שֶׁלָנוּ אֵלֵיהֶם – עוֹשִׂים אֶת הַהִבְדָּל! הַכּוֹוֹנָה הַיָּא לְכָךְ שֶׁהַבְּחִירוֹת שֶׁלָנוּ בְּנוֹגַע לְשִׁינָה, לְמִזּוֹן וּלְפַעֲלוּת גּוֹפְנִית קְבוּעָה מִשְׁפִּיעוֹת עַל אֹרֶךְ הַטְּלוֹמֵרִים שֶׁלָנוּ. לִכֵּן, הַפַּעּוֹלוֹת הַלָּלוּ יִכּוֹלוּ לְתַרוֹם לְבִרְיאוֹתָנוּ בְּטוּוֹחַ הָאֲרוֹךְ, אוּ לְחִלּוּפִין לְפַגּוֹעַ בָּהֶן, כְּמוֹ גַּם לְהַשְׁלִיךְ עַל תּוֹחַלַת הַחַיִּים שֶׁלָנוּ. הַדְּבַר נִכּוֹן גַּם לְגַבֵּי הָרְגָלִים

של חשיבה שלילית, הקשורים להתקצרות הטלומרים. בניגוד לכך, חשיבה חיובית וחוסן נפשי תורמים לתחזוקה הטובה של הטלומרים שלנו. שנית, ברצוני להדגיש את נקודת המבט החברתית הרחבה יותר של אורך הטלומרים. הטלומרים מושפעים מהסביבה שלנו! המשמעות היא שכשאנו תומכים זה בזה, הן ברמת הפרט הן ברמת החברה, אנו תורמים לתחזוקה טובה של הטלומרים ושל בריאות האדם באופן כללי. אם כך, עלינו לזכור שיש לנו תפקיד חשוב בשמירה על אורכם ועל בריאותם של הטלומרים שלנו ושל שאר בני האדם. ישנה השפעה לבחירות שאנו עושים על בסיס יומיומי, כמו גם להשלכות החברתיות שעלינו לשאוף לשפר תמיד, כיוון שהן משתקפות אפילו בביוכימיה המולקולרית הבסיסית ביותר של תאי הגוף.

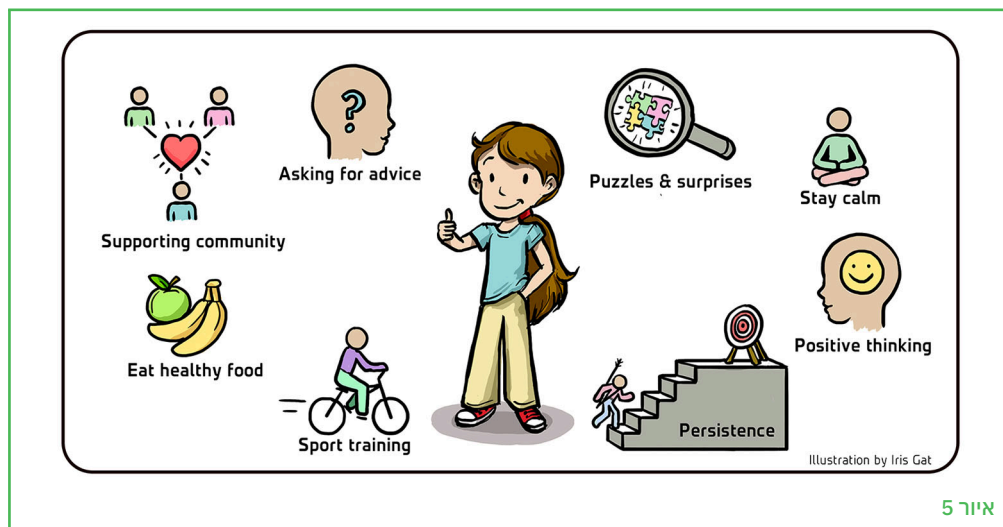
המלצות למוחות צעירים

מִהְיוֹ הַדְרָכִים הַמִּיטְבִּיּוֹת לַעֲסוֹק בַּמַּדַּע, וַאִיךָ תִּהְיֶה מִדְעָנִים וּמִדְעָנוֹת טוֹבִים? יֵשׁ לִי כַּמָּה עֲצוֹת לַתֵּת לָכֵם (אִיור 5). בַּתּוֹר הַתַּחֲלָה, בַּרְצוֹנִי לַהֲדַגִּישׁ אֶת חֲשִׁיבוֹתָה שֶׁל הַהֲתַמְדָּה. אִם אַתֶּם מִתְעַנִּינִים בַּמַּדַּע עֲלֵיכֶם לַדַּעַת שֶׁתְּצַטְרְכוּ לַהֲתַמִּיד, כִּיּוֹן שֶׁלְפַעֲמִים הַתַּחֲוֹם הַזֶּה עֲלוּל לַהִירָאוֹת דִּי מוֹרַכֵּב וּמְאִיִּים. אִף עַל פִּי כֵן, אַל תּוֹוֹתְרוּ! אַז, בַּנְקוּדָה מִסּוּיֵמַת, תִּגְלוּ שִׁיגִיעַ זְמַן נִפְלָא שְׁבוּ תִפְצְחוּ אֶת הָאֲתֵגֵר. כִּשְׁתִּגִּיעוּ לְשֵׁם תַּחֲוֹ סִיפּוֹק גָּדוֹל, וְתַדַּעוּ שֶׁהַהֲתַמְדָּה שֶׁלָּכֶם הַשְׁתַּלְמָה. כְּמוֹ כֵן, כַּדִּי לִהְיוֹת מְרוֹצִים לְאוֹרֵךְ זְמַן, עֲלֵיכֶם לִהְיוֹת מְשׁוֹכְנֵעִים שֶׁאַתֶּם עוֹשִׂים מִשְׁהוּ חֲשׁוֹב וְעֵל עֵרָף. כִּשְׁאַתֶּם בּוֹחֵרִים אֶת הַנְּתִיב הַיִּיעוּדִי לְכָל אַחַת וְאַחַד מִכֶּם בַּמַּדַּע (אוּ בְכָל מְקַצֵּעַ אַחֵר), וְדַאוּ שֶׁאַתֶּם עוֹסְקִים בְּדַבְרִים שֶׁאַתֶּם מֵאֲמִינִים שֶׁכַּדַּאי לַעֲסוֹק בָּהֶם. כֵּךְ, תַּחֲוֹשֶׁת הָעֵרָף שֶׁאַתֶּם מְקִינִים לַעֲבוֹדַתְכֶם תַּעוֹדֵד אֶתְכֶם לַהֲתַמִּיד, אִפִּילוּ בְּזַמְנֵים שְׁבֵהֶם יִירָאֵה לָכֶם שֶׁקָּל יוֹתֵר לוֹוֹתֵר. בְּבַחִירַת דְרַכְכֶם הַיִּיחֻדִית וְהַתַּמְדָּה בָּהּ, זָכְרוּ שֶׁאַפְשֵׁר לַהֲשַׁתְּמֵשׁ בְּכָל כְּלִי בְּדַרְכִים שׁוֹנוֹת – בְּמִיּוֹחַד בְּיַדְעַע וּבְטִכְנוֹלוֹגִיָּה, וְלִכֵּן, שִׁימוּ לֵב שֶׁאַתֶּם רוֹתְמִים אֶת יְכוּלוֹתֵיכֶם לְטוֹבוֹת הָאֲנוּשׁוֹת. כִּשְׁאַתֶּם עוֹשִׂים זֹאת, זָכְרוּ תַּמִּיד גַּם לְבַדּוֹק אֶת הַתּוֹצְאוֹת שֶׁלָּכֶם בְּקִפִּידָה, וְאַל תַּאֲפִשְׁרוּ לַהֲעַדְפוֹת וּלְמִשְׁאֲלוֹת הָאִישִׁיּוֹת שֶׁלָּכֶם לַהֲשַׁפִּיעַ עַל הַדֶּרֶךְ שְׁבֵה אַתֶּם אוֹסְפִים נְתוּנִים וּמִנְתַּחִים אוֹתָם.

איור 5

המלצות למוחות צעירים.

- מקרא (מלמעלה – ציור זכוכית המגדלת, עם כיוון השעון):
- = Puzzles & surprises עיסוק במדע כולל חידות והפתעות
- = Stay calm = הישארו רגועים בפעילות גופנית
- = Positive thinking = אֲמָצוּ חשיבה חיובית
- = Persistence = הקפידו על התמדה
- = Sport training עסקו בפעילות גופנית
- = Eat healthy food = אֲכַלּוּ מזון בריא
- = Supporting community = היעזרו בתמיכת הקהילה
- = Asking for advice = אל תהססו לבקש עצה.



איור 5

ברצוני להדגיש היבט נוסף – חשוב מאוד לדעת לבקש עצות. למדתי זאת בדרך הקשה; בשלב מוקדם בקריירה שלי היססתי לעשות זאת. דאגתי מכך שאם אבקש עזרה אנשים

יעריכו אותי פחות, לכן נמנעתי מלבקש עצות. במבט לאחור, אני מבינה שלפעמים התנהלות זו הקשתה על דרכי. אני אומרת זאת כיוון שככל שהזמן עבר, ובמיוחד כשבני נולד ונאלצתי לתמרן בין היותי אימא צעירה למְשֶׁרָה כפרופסורית באוניברסיטה, הסכמתי לשקול לבקש עצות. הסתבר שזה מְקַל ומסייע מאוד – אנשים שכבר התמודדו עם אתגרים שעמדתי בפניהם, מקצועיים ואישיים כאחד, הציעו לי מגוון פתרונות שלא הייתי חושבת עליהם. הבנתי שברוב המקרים אנשים אוהבים לעזור לזולת, ואף מכבדים את הנכונות לבקש עצה. לכן, אני מעודדת אתכם לבקש עצות לאורך הדרך, בְּמִקוּם להקשות על עצמכם שלא לצורך. כמו כן, חשוב שתזכרו כי ישנם הרבה אנשים שרוצים בהצלחתכם. מְצִאוּ את האנשים האלה וטפחו את הקְשָׁרִים איתם, ולעומת זאת אֵל תִּקְנֶנו חשיבות רבה מדי לאנשים שאינם מסייעים לכם.

ברצוני לדבר איתכם גם על אודות חידות והפתעות. עבורי, המדע מלא בחידות – חלקן גדולות, כאלו שעשויות ללוות אתכם לאורך כל הקריירה שלכם, וחלקן קטנות יותר, שאתם נתקלים בהן יום-יום. החידה הגדולה שאני מנסה לפתור היא להבין איך פועלים החיים עצמם. חידה גדולה זו מתחלקת לחידות קטנות יותר מְדִי יום, כאשר אני מנתחת נתונים ומנסה לפתור שאלה פרטנית הנוגעת לתופעה מסוימת. בעיניי, בתמונה הרחבה, מצד אחד המדע מספיק לי ביטחון ויציבות, בצורת נתיב אובייקטיבי ומדוקדק לְחִקָּר האמת; ומצד אחר המדע מפתיע ומלהיב אותי, באמצעות תגליות בלתי צפויות לאורך הדרך. אני מכנה את התגליות הללו 'הפתעות יום הולדת', ונהנית מהן מאוד. במובן הזה, עֲצָתִי לכם היא ליהנות עד תום מ'הפתעות יום ההולדת' שְׁנִקְרוּת בדרכיכם. אני יודעת שעבור חלקכם הפתעות עלולות להראות מאיימות, אך מבטיחה לכם שההפתעות שבהן תִּתְקַלּוּ בתחום המדע הן טובות, אם תתייחסו אליהן ככאלה. ככל שתעמיקו יותר בתחום התמחות מסוים, כך תרגישו חופשיים יותר לצאת מאזור הנוחות שלכם, ולחקור 'הפתעות יום הולדת' מדעיות.

לסיום, אבקש להפנות כמה מילות עידוד מיוחדות למדעניות העתידיות שביניכם. כפי שתוכלו להתרשם מהמקרה שלי, נשים יכולות לפתח קריירה מדעית המובילה להצלחה, למימוש עצמי, ולרוב גם לשמחה. אני בטוחה שאתן יודעות זאת, אך בשנת 2009, כאשר קרול גריינר ואני זכינו בפרס נובל לפיזיולוגיה או לרפואה, שלוש נשים אחרות זכו גם הן בפרסי נובל, בתחומים כימיה, כלכלה וספרות. הרגשתי שהצלחנו להעביר מִסָּר משמעותי למדעניות ולמדענים מהדור הצעיר – שלפיו זוכי פרס נובל יכולים להיות נשים וגברים באותה המידה. על כן, אני מרגישה שנפל בחלקי הכבוד להיות סְמָל לדורות הבאים של הנשים, ושל כל האנשים, שמעוניינות ומעוניינים לעסוק במדע.

חומרים נוספים

1. [The Telomere Effect: A Revolutionary Approach to Living Younger, Healthier, Longer–Amazon.](#)
2. [Women who changed Science–Elizabeth Blackburn.](#)
3. [Elizabeth Blackburn on the telomere effect–The Guardian.](#)

תודות

ברצוני להודות לננועה שגב על עריכת הריאיון שהיווה את הבסיס למאמר זה, ועל כתיבה משותפת של המאמר. תודה לאיריס גת עבור האיורים, ול-Susan Debad על עריכת כתב היד.

מקורות

1. Muller, H. J. 1938. The remaking of chromosomes. *Collect. Net* 13:181–98.
2. McClintock, B. 1939. The behavior in successive nuclear divisions of a chromosome broken at meiosis. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 25:405–16. doi: 10.1073/pnas.25.8.405
3. Blackburn, E. H., and Gall, J. G. 1978. A tandemly repeated sequence at the termini of the extrachromosomal ribosomal RNA genes in *Tetrahymena*. *J. Mol. Biol.* 120:33–53.
4. Blackburn, E. H. 2010. Telomeres and telomerase: the means to the end (Nobel lecture). *Angew. Chem. Int. Ed.* 49:7405–21. doi: 10.1002/anie.201002387
5. Greider, C. W., and Blackburn, E. H. 1985. Identification of a specific telomere terminal transferase activity in *Tetrahymena* extracts. *Cell.* 43:405–13.
6. Greider, C. W., and Blackburn, E. H. 1987. The telomere terminal transferase of *Tetrahymena* is a ribonucleoprotein enzyme with two kinds of primer specificity. *Cell.* 51:887–98.
7. Yu, G. L., Bradley, J. D., Attardi, L. D., and Blackburn, E. H. 1990. *In vivo* alteration of telomere sequences and senescence caused by mutated *Tetrahymena* telomerase RNAs. *Nature.* 344:126–32.
8. Epel, E. S., Blackburn, E. H., Lin, J., Dhabhar, F. S., Adler, N. E., Morrow, J. D., et al. 2004. Accelerated telomere shortening in response to life stress. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 101:17312–5. doi: 10.1073/pnas.0407162101
9. Blackburn, E. H., Epel, E. S., and Lin, J. 2015. Human telomere biology: a contributory and interactive factor in aging, disease risks, and protection. *Science.* 350:1193–8. doi: 10.1126/science.aab3389
10. Blackburn, E., and Epel, E. 2017. *The Telomere Effect: A Revolutionary Approach to Living Younger, Healthier, Longer.* New York, NY: Grand Central Publishing.

פורסם אונליין: 22 ביולי 2024

נערך על ידי: Fulvio D'Acquisto

מנחים מדעיים: Jean Calleja-Agius | Alina Nico West

ציטוט: Blackburn E (2024) כוח הטלומרים: איך לחיות חיים ארוכים יותר ובריאים יותר. *Front. Young Minds.* doi: 10.3389/frym.2022.995003-he

Blackburn E (2023) Telomere Power: How to Live Longer and Healthier. **תורגם והותאם מ:** Front. Young Minds 10:995003. doi: 10.3389/frym.2022.995003

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

זכויות יוצרים © 2023 © Blackburn 2024. זהו מאמר בגישה פתוחה שמופץ תחת תנאי רישיון [Creative Commons Attribution License \(CC BY\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/). 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

AMELIE, גיל: 14

אני אוהבת מדעים, לומדת פיזיקה, כימיה וביולוגיה בבית הספר. עם זה עליי להודות שיש לי גם תשוקה לתחום המשחק. בזמני הפנוי אני אוהבת לצייר ולעסוק בג'ודו. אני תמיד שמחה ונרגשת לנסוע לחו"ל עם הוריי, וסקרנית מאוד לגבי תרבויות חדשות ונופים אחרים! סוגות הספרות האהובות עליי הן קומדיה; פעולה ואימה; ולאחרונה פיתחתי עניין במגנה (סגנון איור המשמש בקומיקס יפני). אני נהנית לסקור מאמרים מדעיים מעניינים!

AMITOJ, גיל: 14

קוראים לי Amitoj ואני תלמיד כיתה ט. המקצוע האהוב עליי בבית הספר הוא מדע. אני מנגן בסקסופון בלהקת בית הספר שלי, ונהנה לטייל ולעסוק בצילום. אוהב לבשל ולנסות מאכלים חדשים; לשחק כדורסל; לקרוא ספרים ולאייט מילים. כשאגדל, ארצה לעסוק בתחום הרפואה.

הכותבים

ELIZABETH BLACKBURN

הפרופסורית אליזבת בלקברן נולדה ב-1948 בעיר קטנה בטזמניה שבאוסטרליה. היא הייתה ילדה סקרנית מאוד שאהבה חיות, ונמשכה לביולוגיה מגיל צעיר. בשנות ה-70' של המאה הקודמת, בלקברן למדה באוניברסיטת מלבורן שבאוסטרליה, שם קיבלה את התארים הראשון והשני שלה בביולוגיה. לאחר מכן המשיכה בלימודי דוקטורט בביולוגיה מולקולרית באוניברסיטת קיימברידג' שבאנגליה, במסגרתם השתמשה בריצוף דנ"א כדי לחקור את הרכב חומצת הגרעין של בקטריופאג (נגיף התוקף חיידק) מסוים. ב-1975, לאחר שסיימה את לימודי הדוקטורט שלה בביולוגיה מולקולרית, החלה את לימודי הפוסט-דוקטורט במעבדה של פרופ' ג'וזף גול באוניברסיטת ייל שבארה"ב. שם חקרה את הכרומוזומים של הטטרסהימנה, הנפוצה בירוקת המצויה על פני השטח של מאגרי מים. היא גילתה כי הטלומרים של הטטרסהימנה מורכבים מתבניות חזרתיות קצרות של הנוקלאוטידים תימן וגואנין, המסודרים כך: TTGGGG. ב-1978, מונתה לעוזרת פרופסור לביולוגיה מולקולרית באוניברסיטת קליפורניה בברקלי, ארה"ב, שם המשיכה לחקור את הטלומרים של הטטרסהימנה. ב-1985, פרופ' בלקברן עם תלמידתה, קרול גריידר, זיהו את האנזים האחראי להוספת הטלומרים בקצות הכרומוזומים הליניאריים, שלאחר מכן קיבל את השם 'טלומראז'. עבור התגליות הללו פרופ' בלקברן זכתה בפרס נובל לפיזיולוגיה או לרפואה לשנת 2009, במשותף עם הפרופסורית קרול גריידר וחוקר טלומרים נוסף, פרופסור ג'ק שוסטק. ב-1990, פרופ' בלקברן עזבה את ברקלי והמשיכה לחקור



את הטלומרים כפרופסורית באוניברסיטת קליפורניה, סן פרנסיסקו (UCFS). עם חוקרת הפסיכולוגיה אליסה אפל, לימים פרופסורית, היא חקרה את מערכות היחסים בין הטלומרים ללחץ נפשי מתמשך. המחקר הראשון שלהן הוביל לסדרה שלמה של מחקרים העוסקים בקשר שבין אורך הטלומרים לבריאות האדם, בצורות שונות. הממצאים ששיתוף הפעולה המתמשך הזה הניב יצאו לאור ב-2017 בספר מדע לקהל הרחב שכתבו יחד, בשם: 'The Telomere Effect: A Revolutionary Approach' פרופ' בלקברן זכתה בפרסים רבים במהלך הקריירה שלה בהם פרס NAS (האקדמיה הלאומית למדעים של ארה"ב) לביולוגיה מולקולרית (1990); פרס אוסטרליה (1998); פרס הארווי (1999); פרס דיקסון (2000); פרס ASCB (האיגוד האמריקאי לביולוגיית התא) לשירות ציבורי (2004); פרס לוראל-אונסק"ו (ארגון החינוך, המדע והתרבות של האו"ם) לנשים במדע (2008); פרס נובל לפיזיולוגיה או לרפואה (2009), ומדליית הזהב של AIC – המכון האמריקאי לכימיה (2012). *Elizabeth.Blackburn@ucsf.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



קרן משפחת
ששוע
Shashua Family Foundation



Nobel Prize WINNER

איך הופכים רנ"א לדנ"א? התגלית ששינתה את פני הביולוגיה והביוטכנולוגיה

David Baltimore*

המחלקה לביולוגיה, המכון הטכנולוגי של קליפורניה (Caltech), פסדינה, קליפורניה, ארה"ב

סוקרים צעירים

KRISH

גיל: 13



MEHRANEH

גיל: 15



MOHAMMAD

גיל: 12

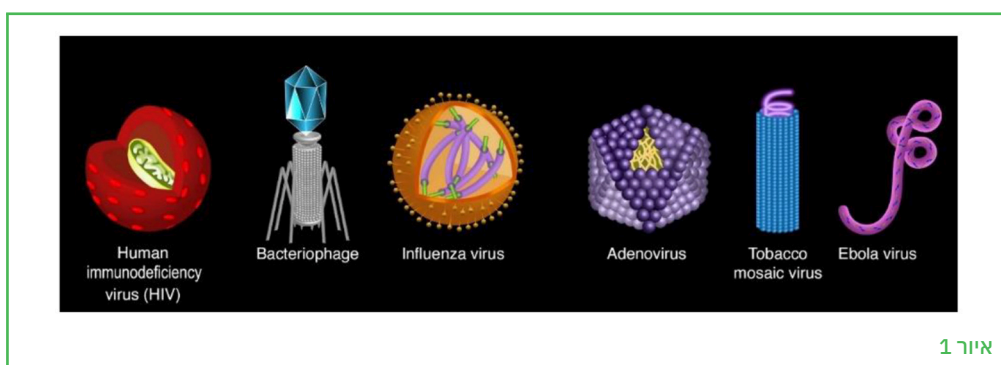


נגיפים, או בשמם הלוועזי, וירוסים, הם מערכות ביולוגיות ייחודיות. אלו הם טפילים המשתמשים בתאים של אורגניזמים אחרים, המכונים מארחים, כדי להתרבות. לעיתים קרובות, נגיפים אף גורמים למארחים לחלות. ישנם נגיפים בעלי מאפיין מעניין ביותר – החומר הגנטי שלהם הוא רנ"א, בעוד כל שאר האורגניזמים המוכרים לנו משתמשים בדנ"א. בתחילת הקריירה שלי חקרתי נגיפי רנ"א, וניסיתי להבין את התהליכים ואת ההתנהגויות הבסיסיים שלהם. כשהתמקדתי בנגיפי רנ"א הידועים כמחוללי סרטן, גיליתי כי הם יכולים לייצר דנ"א מְגֻנְמִי הרנ"א שלהם, בתהליך המכונה 'שְׁעֵתוֹק לאחור'. זו הייתה תגלית משמעותית ששינתה את דרך המחשבה הרווחת, והשפיעה באופן מרחיק לכת על תחומי הביולוגיה, הרפואה והביוטכנולוגיה. במאמר זה, אספר לכם על נגיפים ועל אודות גילוי השעתוק לאחור. כמו כן אתאר כמה השלכות חשובות שהיו לממצאינו, השלכות שתרמו לשיפור חיי אדם רבים, ואפילו להצלחתם.

פרופסור דייוויד בולְטִימור זכה בפרס נובל לפיזיולוגיה או לרפואה לשנת 1975, במשותף עם פרופ' רְנָאטוֹ דוֹלְבֶּקוֹ ופרופ' הווארד מרטין טֶמִין, על תגליותיהם הנוגעות לאינטראקציה בין נגיפים מחוללי גידולים לחומר הגנטי של התא.

עולמם המרתק של הנגיפים

נגיפים הם חלקיקים קטנים המדביקים תאים, ולעיתים מחוללים מחלות. מספרם של הנגיפים עצום ואינו ניתן למנייה. לכל יצור חי, ואפילו לכל חיידק, יש מערך נגיפים משלו. עד כה זהו יותר ממיליון סוגים שונים של נגיפים! אתם ודאי מכירים כמה מהם, כמו נגיף השפעת שמחולל את מחלת השפעת; נגיף סארס-קוב-2 הגורם לקוביד-19 (מחלת נגיף קורונה 2019), ונגיף הנויריפלה-זוסטר, הגורם לאבעבועות רוח. אולי שמעתם על נגיף הכנף החיסוני האנושי (HIV), הגורם למחלת האיידס, או על נגיף האבולה. הנגיפים שונים מאוד במבנה (ראו איור 1) במספר הזנים שהם יכולים להדביק (כלומר אם ביכולתם להדביק רק זן מסוים או כמה זנים), ובמידת הסיכון שהם מהווים לאורגניזמים שהם מדביקים, המכונים 'מארחים'.



איור 1

כדי להתרבות, הנגיפים חודרים לתא המארח ומכניסים אליו את החומר הגנטי שלהם. בדרך זו, הם גורמים לתא להתייחס לחומר הגנטי כאל שלו, ומשעבדים את התא המארח במרמה, כך שייצר עותקים רבים של הנגיף. הנגיפים מתרבים במהירות מסחררת – בתוך 20-30 דקות בחיידקים, ובתוך שעות ספורות ביונקים, ובכלל זה בני אדם. הם מתפשטים כשהם עוברים ממארח אחד לאחר. לדוגמה, ישנם נגיפים שיכולים לעבור בין בני אדם בעיטוש, או כשמישהו נוגע במשטח שאדם שנושא את הנגיף נגע בו קודם לכן. אנו יכולים להגן על עצמנו מפני נגיפים מסוימים בעזרת חיסונים, וקל יותר להתמודד עם נגיפים המדביקים רק בני אדם.

כפי שאתם אולי יודעים, דנ"א הוא מולקולה הנושאת את המידע הגנטי במערכות חיות. לדנ"א יש 'קרוב משפחה' בשם רנ"א. הוא מתפקד כעותק נייד של המידע הקיים בדנ"א, ומאפשר ייצור של חלבונים (כדי ללמוד עוד על אודות דנ"א, רנ"א וחלבונים, קראו את המאמר מתוך אוסף הנובל על אודות פירוק ממוקד של חלבונים, ואת המאמר מתוך אוסף הנובל על אודות שחבור רנ"א). החומר הגנטי של כל האורגניזמים בממלכת החיות הוא דנ"א. נגיפים הם יוצאי דופן כיוון שבסוג מסוים של נגיפים, המכונה נגיפי רנ"א, החומר הגנטי הוא רנ"א (ישנה סברה שלפיה הנגיפים הם שרידים של עולם קדום יותר, שבו רנ"א שימש בתור החומר הגנטי. קראו כתבה זו כדי ללמוד עוד על אודות עולם הרנ"א הקדום הזה). נגיפי דנ"א ונגיפי רנ"א משתמשים בחומר הגנטי שלהם בדרכים שונות כדי לייצר סוג מסוים של רנ"א בשם רנ"א שליח (mRNA) [1], המשמש לייצור חלבונים. במסגרת מחקרי יצרתי מערכת סיווג לנגיפים המכונה סיווג בולטימור. מערכת זו ממינת

נגיף (Virus)

בלעז: וירוס. חלקיק זעיר שמדביק תאים חיים ומשתמש במנגנוני התאים כדי לייצר נגיפים נוספים. נגיפים יכולים להדביק את כל צורות החיים.

איור 1

סוגי הנגיפים השונים. נגיפים קיימים במגוון צורות. לכל חיה ולכל חיידק מערך נגיפים משלהם (התמונה נלקחה מכאן). מקרא (משמאל לימין): נגיף הכשל החיסוני האנושי (HIV) – בקטריופאג (נגיף התוקף חיידק) – נגיף השפעת – נגיף חיידק (גורם לזיהום בדרכי הנשימה) – נגיף מוזיקת הטבוק (פוגע בצמחים) – נגיף האבולה (מחלה טלנית מידבקת).

רנ"א שליח (Messenger RNA, mRNA)

סוג של רנ"א הנושא את ההוראות לייצור חלבונים, אשר נע מגרעין התא למפעל החלבונים של התא (הריבוזום).

נגיפים לפי הדרך שבה הם מייצרים רנ"א שליח. במסגרת סיווג זה, ישנם שני סוגים של נגיפי דנ"א המשתמשים בדנ"א בלבד לייצור רנ"א שליח (קבוצות I ו-II); שלושה סוגים של נגיפי רנ"א המשתמשים ברנ"א בלבד לייצור רנ"א שליח (קבוצות III, IV ו-V), ושתי קבוצות של נגיפים המשתמשים הן בדנ"א הן ברנ"א לייצור רנ"א שליח (קבוצות VI ו-VII) [1, 2].

חוקרים את נגיפי רנ"א

כשהתחלתי את הקריירה המדעית שלי בשנות ה-60 של המאה הקודמת, רציתי לחקור את הכימיה היסודית של החיים. הבנתי שהנגיפים מספקים הזדמנות מיטבית לעשות זאת, כיוון שהם האורגניזמים הפשוטים ביותר בעולם. יכולנו לחקור את הנגיפים ולהבין את מגוון הפעולה שלהם בפירוט – עד לרמה המולקולרית.

בתקופה ההיא, ידענו מעט מאוד על אודות הדרך שבה נגיפי הרנ"א מתרבים. בתחילה, חקרתי נגיף רנ"א דמוי נגיף הפוליו (שיתוק ילדים), שגידל בעכברים (קבוצה IV לפי סיווג בולטימור, דומה למדי לנגיף סארס-קוב-2). ניסיתי להבין איך הנגיף הזה מתרבה, וכיצד הוא משפיע על חיי המארח. פענחתי את מנגנון ההתרבות של הנגיף, ואז הרחבתי את הממצאים לנגיפי רנ"א אחרים. לאורך התהליך גיליתי כמה חלבונים חשובים, המכונים **אֶנְזִימִים**, היוצרים את הדנ"א ואת הרנ"א [3, 4].

בסביבות 1970, התחלתי לתהות אם ייתכן שנגיפי הרנ"א מתרבים בדרכים אחרות, שאינן מוכרות לנו. התעניינתי במיוחד בנגיפי רנ"א הגורמים למחלת הסרטן, אשר מכונים **נגיפי רנ"א מחוללי גידול**. כשהתחלתי לחקור את הנגיפים הללו, לא ידעתי איזו הפתעה גדולה צופן לי העתיד.

שעתוק לאחור

בשנות ה-60 של המאה ה-20, עמיתי, פרופ' הווארד טמין, הציג את ההשערה שלפיה נגיפי רנ"א מחוללי גידול יכולים לשעתק דנ"א מהרנ"א שלהם. לאף אחד לא היו ראיות ברורות כי זה המצב, ורבים לא האמינו לכך. התפיסה שרווחה אז (המכונה 'הדוגמה המרכזית של הביולוגיה המולקולרית', להלן: 'הדוגמה') הייתה שרנ"א מיוצר מדנ"א (בתהליך המכונה שעתוק), ולא להפך (ראו **איור 2**). אף על פי כן, לא היה שום דבר בלתי אפשרי בשעתוק של רנ"א לדנ"א, כיוון ששניהם מולקולות דומות מאוד, המיוצרות באופן דומה. ב-1970, החלטתי לבדוק את ההשערה שלפיה ייתכן כי רנ"א משעתק 'חזרה' לדנ"א. כדי לעשות זאת, פתחתי את נגיפי הרנ"א מחוללי הגידול, והוספתי מולקולות רדיואקטיביות של קדם-דנ"א (ראו **מסגרת 1**). אלו הן אבני הבניין המאפשרות לנו לזהות נוכחות של כל דנ"א שנוצר בדגימה מסוימת, היות שהדנ"א הזה הופך רדיואקטיבי. בתוך כמה ימים מתחילת הניסוי עלה בידי להראות כי דגימת נגיפי הרנ"א מחוללי הגידול הצליחו לייצר דנ"א [4].

אֶנְזִימִים (Enzymes)

חלבונים ששולטים במהירות התהליכים הכימיים המתרחשים בתאים חיים.

נגיפי רנ"א מחוללי גידול (RNA tumor viruses)

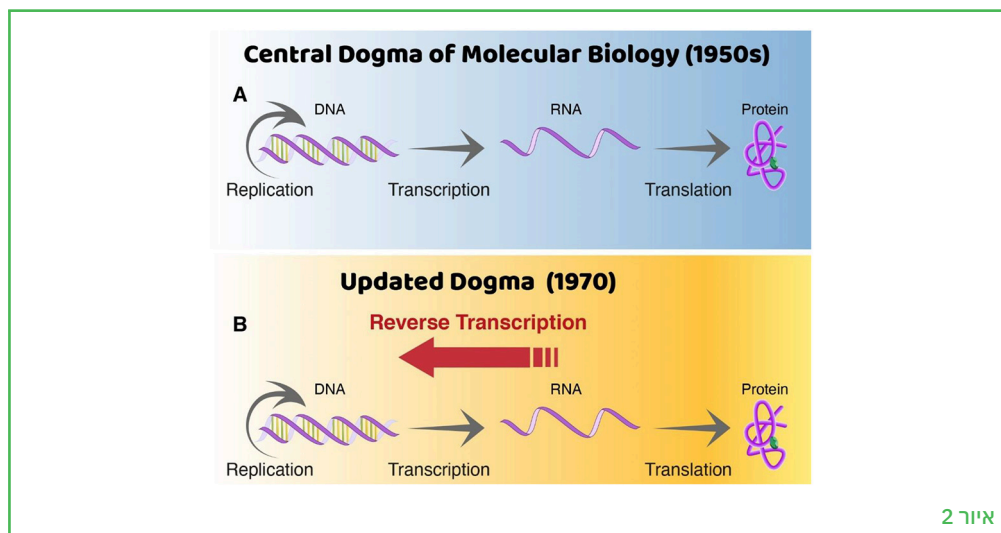
נגיפי רנ"א הגורמים לגידול על ידי הטמעת הגנום (מכלול המידע התורשתי באורגניזם מסוים) שלהם בגנום של המארחים.

איור 2

שינוי בדוגמה. (A) לפני שהשעתוק לאחור התגלה, האמינו כי רנ"א יכול להיות מיוצר מדנ"א בתהליך השעתוק. עם זה הדעה הרווחת בקרב המדענים הייתה כי לא ניתן לייצר דנ"א מרנ"א. (B) התגלית שלי ב-1970 הראתה שאפשר לייצר דנ"א מרנ"א, בתהליך המכונה 'שעתוק לאחור'. הרעיונות (דוגמות) הבסיסיים בביוכימיה המולקולרית. שכפול דנ"א – התהליך של יצירת שתי מולקולות דנ"א זהות ממולקולת דנ"א מקורית. מקרא: (A) הדוגמה המרכזית של הביוכימיה המולקולרית (שנות ה-50 של המאה ה-20); (B) הדוגמה המעודכנת = Replication = שכפול = Transcription = שעתוק = Translation = תרגום = Protein = חלבון = Reverse Transcription = שעתוק לאחור.

שעתוק לאחור (Reverse Transcription)

התהליך שבו דנ"א מועתק מרנ"א – 'היפוכו' של השעתוק הרגיל, שבו רנ"א מועתק מדנ"א.



איור 2

מסגרת 1. מציאת דנ"א בתוך נגיפי רנ"א מחוללי גידול.

כך ביצעתי את התהליך לגילוי דנ"א באמצעות קדם-דנ"א רדיואקטיבי: קניתי נוקלאוטידים מוכנים (אבני הבניין של הדנ"א – G, C, T, A), מסומנים באמצעות מימן רדיואקטיבי. הנחתי את הנגיף ואת הנוקלאוטידים המסומנים במבחנה, והשתמשתי בדטרנט כדי לפרק את קרום התא השומני המכסה את הנגיף. זה אפשר לנוקלאוטידים המסומנים לבוא במגע עם הרנ"א של הנגיף ועם אַנְזִים הַטְרַנְסְקְרִיפְטָז (שעתוק) ההופכי, שיוצר דנ"א מרנ"א בתהליך השעתוק. הוספתי מנג'זים, הדרוש לפעולת האנזים, והנחתי את המבחנה באמבט מים בטמפרטורה של 37 מעלות צלזיוס. האנזים בנה דנ"א רדיואקטיבי מהנוקלאוטידים המסומנים. השתמשתי במסננת כדי להפריד את מולקולות הדנ"א הארוכות משאריות הנוקלאוטידים המסומנים, וכשהפעלתי את גלאי הקרינה, גיליתי כי מולקולות הדנ"א היו רדיואקטיביות! כדי להוכיח שהמולקולה אכן הייתה מולקולת דנ"א, השתמשתי באנזים בשם Dnase, המפרק דנ"א. כשהוספתי את האנזים הזה לתוצרי התגובה וסיננתי אותם שוב באמצעות המסננת, לא קיבלתי אות רדיואקטיבי. זה הוכיח כי החומר שבדקתי בתגובה המקורית בהחלט היה דנ"א.

הממצאים שלי הצביעו על כך שנגיפי הרנ"א מחוללי הגידול יכולים לייצר דנ"א מגנום הרנ"א שלהם, כיוון שלא היה מקור אפשרי אחר של דנ"א בניסוי. הראיתי גם שאם אנו מוציאים את הרנ"א מהדגימות, אין בהן דנ"א. זו הייתה תגלית ענקית של התהליך שזכה לשם שַעֲתוּק לְאִחֹר (reverse transcription). עבור תגלית זו זכיתי, במשותף עם פרופ' רְנָאטו דוֹלְבֵקוֹ ופרופ' הווארד מרטין טֶמִין, בפרס נובל לפיזיולוגיה או לרפואה לשנת 1975 – חמש שנים בלבד לאחר שערכתי את הניסויים.

אַנְזִים חדש הממיר רנ"א לדנ"א

כשגיליתי את השעתוק לאחור, היה ידוע כי אנזימים הם המעתיקים את הרנ"א ואת הדנ"א. לכן היה לי ברור שבחלקיקי הנגיף נכח אַנְזִים. באותה עת, לא ידענו איזה אנזים ממיר רנ"א לדנ"א, ולא הבנו את התהליך שאנזים זה מבצע. עמיתי ואני השקענו עשר שנים נוספות במטרה לגלות איזה אנזים היה אחראי לשעתוק לאחור, ולפענח את המנגנון המורכב של יצירת עותק של דנ"א מרנ"א. כדי לעשות זאת, פיתחנו מערכת חדשנית שבה יכולנו להוסיף מולקולות ידועות מראש של רנ"א, ולבחון מה נוצר מהן. מערכת זו אפשרה לנו להתבונן בתגובות כימיות שאף אחד לא ראה בעבר. מצאנו את האנזים שמייצר עותקים

טרנסקריפטאז הופכי (Reverse Transcriptase)

אנזים המבצע שעתוק לאחור
(ראו להלן במילון המונחים).
מכונה בעברית
'המשעתק במהופך'.

איור 3

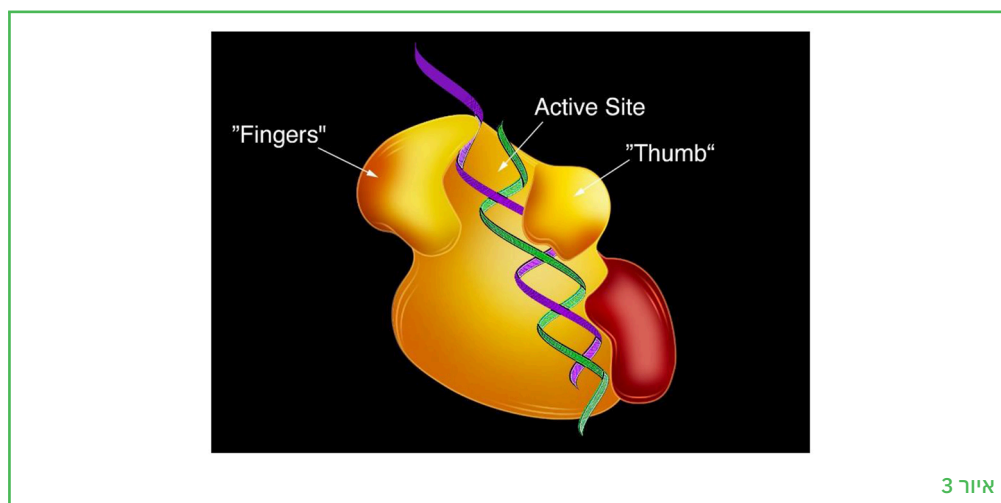
המבנה של אנזים

הטרנסקריפטאז ההופכי.
מבנהו של הטרנסקריפטאז
ההופכי דומה בצורתו לכף יד
בעלת 'אצבעות' (Fingers),
ו'אגודל' (Thumb) אשר לו
יכולת תנועה, ומסוגל
להיפתח ולהיסגר. באזור
המרכזי של האנזים יש אתר
פעיל (Active site), שבו
דנ"א מיוצר מרנ"א [נלקח
ממקור [6]].

רטרו-וירוסים (Retroviruses)

נגיפים המייצרים דנ"א על ידי
העתקת גנום הרנ"א שלהם,
תוך שימוש בשעתוק לאחור.

של דנ"א מרנ"א, וקראנו לו 'טרנסקריפטאז הופכי' (reverse transcriptase) [5]. כמה שנים לאחר שגילינו את האנזים הזה, מדענים מקבוצות מחקר אחרות גילו את המבנה שלו בעזרת שיטת דימות בשם 'קריוסטלוגרפיה בקרני רנטגן' (כדי להרחיב את ידיעותיכם על אודות שיטה זו והתפתחותה, קראו את מאמר אוסף הנובל הזה). המדענים הללו גילו כי לאנזים הטרנסקריפטאז ההופכי מבנה דמוי כף יד עם 'אצבעות', ובכלל זה 'אגודל' בעל יכולת תנועה המסוגל להיפתח ולהיסגר, ואזור מרכזי בשם 'האתר הפעיל', שבו דנ"א מיוצר מרנ"א (איור 3).



איור 3

טיפולים חדשים לזיהומים נגיפיים ולסרטן

תגליתנו לגבי השעתוק לאחור והטרנסקריפטאז ההופכי היא בעלת השלכות מרחיקות לכת – הן מבחינת הבנתנו של תהליכים מולקולריים בסיסיים בתאים והן בהיבט טיפול במחלות. ראשית, התגלית שלנו סללה את הדרך להבנת נגיפים מסוג מסויים, המכונים **רטרו-וירוסים**. אלה הם נגיפי רנ"א שעושים שימוש בשעתוק לאחור כדי ליצור דנ"א נגיפי מרנ"א נגיפי. אז, הדנ"א הנגיפי מוטמע (מוכנס) בדנ"א של התא המארח (בעזרת אנזים אחר שנקרא אינטגרז). כך הוא הופך לחלק מהחומר הגנטי של התא המארח (איור 4). לאחר שהדנ"א הנגיפי מוטמע בדנ"א של המארח, המארח מייצר חלבונים נגיפיים היוצרים חלקיקים חדשים של הנגיף.

נגיף HIV (ראשי תיבות של Human immunodeficiency virus – נגיף הכֶּשֶׁל החיסוני הנרכש) הגורם למחלת האיידס, הוא רטרו-וירוס מוכר ובעייתי ביותר (כדי ללמוד עוד על אודות HIV ואיידס, קראו את מאמר אוסף הנובל הזה). נגיף HIV התגלה לראשונה ב-1983, כשנתיים לאחר שמחלת האיידס הייתה למגפה עולמית. הנגיף זוהה הודות לטרנסקריפטאז ההופכי שלו, וכך פותחו תרופות לטיפול במחלת האיידס. לולא היינו מגלים את הטרנסקריפטאז ההופכי ב-1970, כעשור לפני התפרצות האיידס, כנראה שלא היה ביכולתנו לגלות את הנגיף, והיינו משקיעים זמן רב בניסיון להבין מדוע המחלה מתרחשת. התגלית המהירה יחסית של נגיף HIV הצילה ושיפרה את חייהם של אנשים רבים, שהיו ודאי סובלים הרבה יותר לו מחלת האיידס הייתה מתפרצת לפני גילוי השעתוק לאחור.

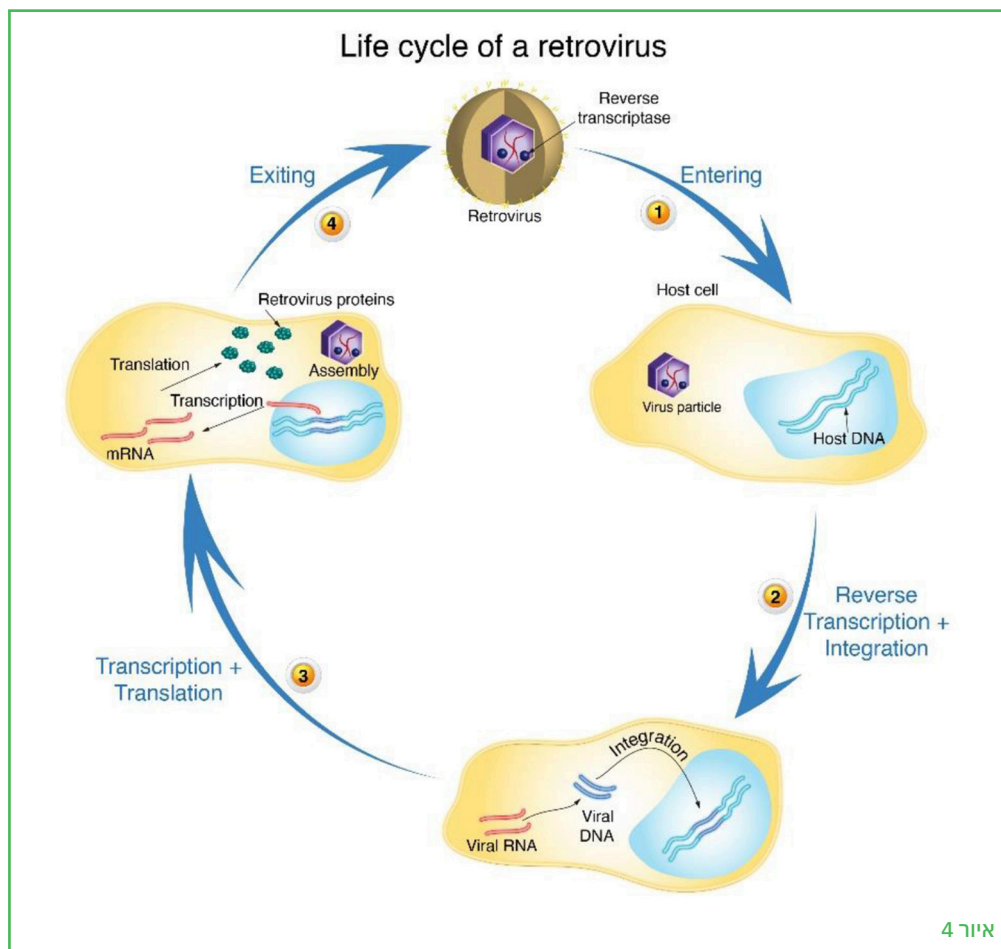
איור 4

מחזור חיי של רטרו-וירוס (Life cycle of retrovirus)

(1) רטרו-וירוס נכנס (Entering) לתא המארח (Host cell), ומשיל את המעטפת החיצונית שלו. (2) הרטרו-וירוס משתמש בשעתוק לאחור (Reverse Transcription) כדי ליצור דנ"א נגיפי (Viral DNA) מנגנום הרנ"א שלו. אז, הדנ"א הנגיפי נטמע Integration בגנום של התא המארח, והופך חלק מהדנ"א של המארח. (3) לאחר ההטמעה, המארח משעתק (Transcription) רנ"א שליח (mRNA) מתרגם (Translation) את הרנ"א שליח הנגיפי, במטרה לייצר חלבונים ויראליים (Retrovirus proteins) שלאחר מכן יוצרים (Assembly) חלקיקי נגיף חדשים. (4) הנגיפים החדשים מדביקים תאים אחרים (האיור נלקח מאיור של פרופ' דייוויד בולטימור). מקרא:

Host DNA = דנ"א של המארח

Virus particle = חלקיקי נגיף
Viral RNA = רנ"א נגיפי
Exiting = יציאה.



איור 4

התגלית שלנו גם מילאה תפקיד מרכזי בטיפול בסרטן. לפנייה, לא ידענו מדוע וכיצד נגיפי רנ"א גורמים לסרטן. במחלת הסרטן לסוגיה השונים, גדילת התאים משתנה מגדילה מבוקרת לגדילה בלתי מבוקרת. זו יוצרת לעיתים גושים גדולים, הנקראים גידולים, ברקמות הגוף, או מתבטאת בגדילה מהירה של תאים בדם, כמו במקרה של לוקמיה (סרטן הדם). כיוון שמולקולת הרנ"א אינה יציבה באופן כללי, לא סברנו שהיא יכולה לגרום לשינוי קבוע בהתנהגות התא. לעומת זאת הדנ"א היא מולקולה יציבה מאוד. גילינו כי נגיפי הרנ"א מחוללי הגידול מבצעים שעתוק לאחור ויוצרים עותקי דנ"א מהרנ"א שלהם, ובכך הופכים עצמם לנגנים בתאים שהם מדביקים. אז, הנגיפים מביאים גנים חדשים לתוך התא, והגנים הללו מייצרים חלבונים. החלבונים הנגיפיים יכולים 'לעקוף' את הגנים של המארחים, להכריח את התא לגדול ולהתחלק בצורה מתמדת, וכך להפוך את התא הנגוע לתא סרטני.

הקשר בין סרטן לנגנים, שאותו גילינו כשחקרנו את נגיפי הרנ"א מחוללי הגידול, התברר כהליך חשוב מאוד בהתפתחות הסרטן. התגלית שלנו הציגה תרחיש מסוים לדברים המשתבשים בתאים סרטניים, והסתבר שהוא נכון לסוגים רבים של סרטן, ולא רק לסוגים הנגרמים על ידי נגיפים. ההשערה שהעלינו, שלפיה סרטן עלול להיות בעיה גנטית, הביאה להרחבה של חקר הסרטן, והובילה לגילוי תרופות מצילות חיים, לרבות 'סם הפלא' הנקרא גליק, שחוסם חלבון מסוים המסמן לתאים כי עליהם לגדול. פיתוח התרופות הללו התבסס על ההבנה שלפיה גן מסוים גורם לסוג מסוים של סרטן. כשאנו יכולים לדכא את פעולתו של חלבון מסוים המיוצר מאותו הגן, ביכולתנו לדכא את הסרטן.

שימושים בביוטכנולוגיה ובריפוי גְנִי

ביוטכנולוגיה (Biotechnology)

תחום תעשייתי שבו נעשה שימוש בתהליכים ביולוגיים למטרת פיתוח מוצרים.

תגליתנו אף סייעה לקדם את תחום הביוטכנולוגיה, שבו לעיתים קרובות מייצרים חלבונים המשמשים ליישומים שונים, ובכלל זה לתרופות. אחת השאלות הראשונות ששאלנו לאחר שגילינו את הטרנסקריפטאז ההופכי, הייתה: האם הוא יכול להעתיק כל רנ"א, או רק רנ"א נגיפי? התברר כי הטרנסקריפטאז ההופכי יכול לייצר עותקים של דנ"א מכל רנ"א, אם מספקים לו חתיכה קטנה של דנ"א המתאים לרנ"א שאנו רוצים להעתיק, בתור 'מְתַנֵּע'. המשמעות הייתה כי באפשרותנו להפוך כל רנ"א שליח – המהווה את התבנית לייצור החלבון – לדנ"א, וכך למעשה להפוך אותו לְגֵן. מרגע שרנ"א שליח זה מתקיים כְּגֵן, אנו יכולים להניח אותו בתאים (כמו חיידקים), שיכולים לייצר ממנו עותקים רבים של רנ"א שליח, ולאחר מכן חלבונים. היכולת להפוך כל רנ"א שליח לדנ"א ואז לייצר עותקים רבים של החלבון הרצוי הייתה בשורה מהפכנית עבור תעשיית הביוטכנולוגיה, והובילה לפיתוח מגוון תרופות חדשות.

בריפוי גְנִי, משתמשים בדרך כלל ברטרו-וירוסים ככלי לריפוי מחלות גנטיות [7]. אחת הדוגמאות המוצלחות ביותר לריפוי גני באמצעות רטרו-וירוסים היא במקרה של 'מחלת ילד הבועה', או בשמה הרשמי, כְּשָׁל חיסוני משולב חמור (Severe combined immunodeficiency, SCID). לתינוקות שנולדים עימה אין מערכת חיסונית מתפקדת, ולכן כל זיהום הוא קטלני עבורם. בעבר, היה על התינוקות הללו לחיות בבועות פלסטיק שהפרידו אותם מהסביבה החיצונית כדי שלא יִחָלוּ. כיום, ריפויים גניים חדשניים באמצעות רטרו-וירוסים שמחליפים את הגנים הפגומים בגנים מתפקדים, יכולים לשקם את המערכות החיסוניות של תינוקות חולים ולאפשר להם לחיות חיים רגילים.

במקור, לא התמקדתי בחקר מחלות ובניסיון לרפא אנשים. בתחילה התעניינתי רק במדע הבסיסי. הייתי סקרן לגבי נגיפים, ורציתי להבין אותם וכיצד הם משפיעים על המארחים שלהם. אולם רצה הגורל ולידע החדש שסייעתי לחשוף היו, ועדיין ישנן, השלכות מרחיקות לכת על ביוטכנולוגיה ועל תחומים מסוימים בעולם הרפואה. זו אחת הדוגמאות למוטיב חוזר במדע: יישומים המשפרים את איכות החיים, ואף מצילי חיים, נובעים לעיתים קרובות מידע מדעי חדש.

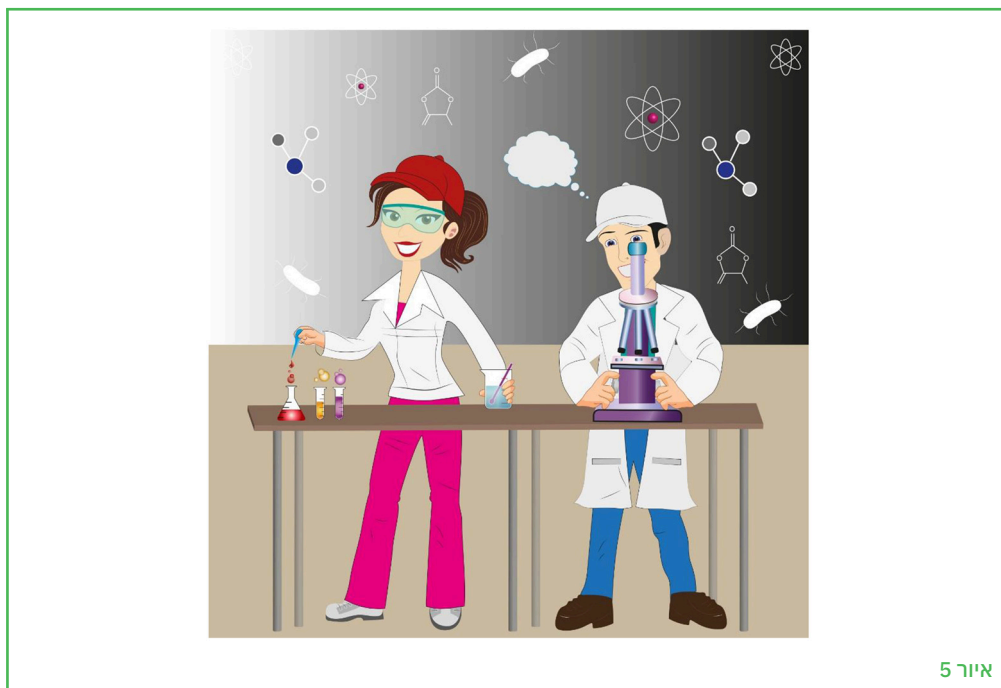
המלצות למוחות צעירים

כשאני עובד עם תלמידים וסטודנטים, אני מעודד אותם להיות עצמאים עד כמה שניתן – לחשוב באופן עצמאי על אודות בעיות ופתרונות, ולחקור את הבעיות הללו במעבדות שמעודדות אותם בדרכם לעצמאות. לעיתים קרובות קשה לסטודנטים צעירים לעבוד בצורה עצמאית, אך עליהם לעשות זאת, כיוון שהמדע מבוסס על הידע של מדענים בודדים, ועל עבודתם הפרטנית. כיום, אנו מתמקדים בעיקר בשיתוף פעולה ובעבודה משותפת, וזה בהחלט חשוב מאוד. אולם בסופו של דבר הדמיון של המדענית או המדען, הידע של כל אחד מהם ועבודתם הקשה הם שמובילים לתגליות כמו הטרנסקריפטאז ההופכי, ולתגליות רבות אחרות שמתרחשות מדי יום. אני מעודד את תלמידיי, וגם אתכם, לבחור בקריירה שתספק לכם עצמאות בשלב מוקדם ככל הניתן, ותאפשר לכם למצוא את דרככם האישית

במדע (איור 5). המשמעות היא לא רק לחקות את שיטות המחקר של המנחים שלכם, אלא למצוא את דרככם הייחודית לעשות דברים. כדי לנהל מחקר מוצלח, עליכם לגבש הבנה מעמיקה של הנושא שבו אתם מתמקדים, למשל אורגניזם או מחלה מסוימים. כשאתם נכנסים לתחום הביולוגיה, שבו הדברים מורכבים ומצריכים כישורים רבים ומגוונים, עליכם להבין לעומק בעיה מוגדרת אחת או שתיים, ולהתמקד רק בהן. זה יאפשר לכם להעמיק את הידע שלכם. בשלב מאוחר יותר בקריירה שלכם, ייתכן שתבחרו להרחיב את מבטכם ולבחון את המתרחש בתחומים אחרים בביולוגיה ובמדע בכלל, אך בשלבים הראשוניים של הקריירה המדעית, המיקוד וההעמקה חשובים מאוד.

איור 5

המלצות למוחות צעירים. אני מעודד את אלו מכם המעוניינים בקריירה מדעית להיות עצמאיים ולמצוא את דרככם הייחודית.



איור 5

את ההנאה הגדולה ביותר שלי כמדען אני שואב מגילוי דברים חדשים דרך הניסיון למצוא פתרון לבעיות בתחום הביולוגיה. אני מוצא שאלו החיים המתגמלים ביותר שאפשר לקיים, ומעודד אנשים לפנות לכיוון זה, אם מוחותיהם פועלים בצורה זו. רבים אינם מעוניינים לבלות את זמנם בניסיון לפתור בעיות, וזה בסדר. הכי חשוב להבין מהו הדבר שמסב לכם הנאה, ולעסוק בו ב'מְשָׁרָה מלאה'. לא קל להיות מדען, כמו גם לעשות כל דבר שהוא מתוך מחויבות מלאה ובעומק רב. עם זאת כאשר תגיעו לעומקים הללו, תחושו סיפוק שייתכן כי לא תחוו לעולם באף דרך אחרת.

תודות

ברצוני להודות לנועה שגב על עריכת הריאיון שהיווה את הבסיס למאמר זה, ועל כתיבה משותפת של המאמר, ולזהבה כהן על האיורים.

מקורות

1. Baltimore, D. 1971. Expression of animal virus genomes. *Bacteriol. Rev.* 35:235–41.

2. Koonin, E. V., Krupovic, M., and Agol, V. I. 2021. The Baltimore classification of viruses 50 years later: how does it stand in the light of virus evolution? *Microbiol. Mol. Biol. Rev.* 85:e00053-21. doi: 10.1128/MMBR.00053-21
3. Baltimore, D., and Franklin, R. M. 1962. The effect of Mengovirus infection on the activity of the DNA-dependent RNA polymerase of L-cells. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 48:1383–90.
4. Baltimore, D. 1970. Viral RNA-dependent DNA polymerase: RNA-dependent DNA polymerase in virions of RNA tumour viruses. *Nature* 226:1209–11.
5. Coffn, J. M., and Fan, H. 2016. The discovery of reverse transcriptase. *Annu. Rev. Virol.* 3:29–51. doi: 10.1146/annurev-virology-110615-035556
6. Alberts, B., Johnson, A., Lewis, J., Raff, M., Roberts, K., and Walter, P. 2002. *Site-Specific Recombination. In Molecular Biology of the Cell.* 4th ed. New York, NY: Garland Science.
7. Anson, D. S. 2004. The use of retroviral vectors for gene therapy-what are the risks? A review of retroviral pathogenesis and its relevance to retroviral vector-mediated gene delivery. *Genet. Vacc. Ther.* 2:1–13. doi: 10.1186/1479-0556-2-9

פורסם אונליין: 22 ביולי 2024

נערך על ידי: Idan Segev

מנחים מדעיים: Ishita Choudhary | Fatemeh Talebian

ציטוט: Baltimore D (2024) איך הופכים רנ"א לדנ"א? התגלית ששינתה את פני הביולוגיה והביוטכנולוגיה. *Front. Young Minds.* doi: 10.3389/frym.2023.1080663-he

תורגם והותאם מ: Baltimore D (2023) Turning RNA Into DNA: The Discovery That Revolutionized Biology And Biotechnology. *Front. Young Minds* 11:1080663. doi: 10.3389/frym.2023.1080663

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

זכויות יוצרים © 2023 © Baltimore 2024. 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

KRISH, גיל: 13

Krish הוא תלמיד כיתה ז שאוהב מחקר מדעי ותופעות מדעיות. הוא פעיל מאוד בדיונים מדעיים, ונהנה לדון בתגליות מדעיות עם הוריו, בני דודיו, חבריו, מוריו וחבריו לכיתה. Krish הוא שחיין מקצועי, ואוהב לשחק כדורגל.



**MEHRANEH, גיל: 15**

היא, שמיה הוא Mehraheh. אני אוהבת לקרוא, לאפות, לצייר ולטייל. בעתיד ארצה להיות עורכת דין.

**MOHAMMAD, גיל: 12**

היא, קוראים לי Mohammad. אני אוהב לג'ובנייה, וכן לעסוק בפעילות גופנית. בעתיד ארצה להיות מהנדס.

הכותבים

DAVID BALTIMORE

פרופסור דייוויד בולטימור הוא וירולוג אמריקאי, זוכה מינוי הפרופסורה על שם השופטת Shirley Hufstedler במכון הטכנולוגי של קליפורניה (Caltech, קליפורניה, ארה"ב). פרופסור בולטימור למד לתואר ראשון בכימיה במכללת Swarthmore (פנסילבניה, ארה"ב). לאחר מכן, השלים שנת לימודים נוספת במכון הטכנולוגי של מסצ'וסטס (MIT, מסצ'וסטס, ארה"ב), והמשיך את לימודיו באוניברסיטת רוקפלר (ניו יורק, ארה"ב), שם קיבל את התואר השלישי שלו בוירולוגיה של חיות. בין 1963 ל-1964, פרופסור בולטימור שירת כעמית פוסט-דוקטורנט בתחום הביופיזיקה ב-MIT. אז, החליט לשנות כיוון וחקר נגיפים של חיות בקולג' לרפואה על שם אלברט איינשטיין (ניו יורק, ארה"ב). ב-1965, קיבל את המשרה העצמאית הראשונה שלו במכון Salk בלה-הויה (קליפורניה, ארה"ב). ב-1968, חזר ל-MIT כחבר סגל (שם הוא עובד כיום), ומיקד את מחקרו במחלת הסרטן. בין 1997 ל-2006, פרופסור בולטימור כיהן כנשיא Caltech. במהלך תקופה זו הוא גם היה נשיא האיגוד האמריקאי לקידום המדע. לאורך הקריירה שלו זכה פרופסור בולטימור בפרסים רבים בהם פרס NAS (האקדמיה הלאומית למדעים) לביולוגיה מולקולרית (1974); פרס נובל לפיזיולוגיה או לרפואה (1975); מדליית סר האנס קרבס (Hans Krebs, 1997); המדליה הלאומית למדעים (1999), ופרס לסקר (2021).

* baltimo@caltech.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



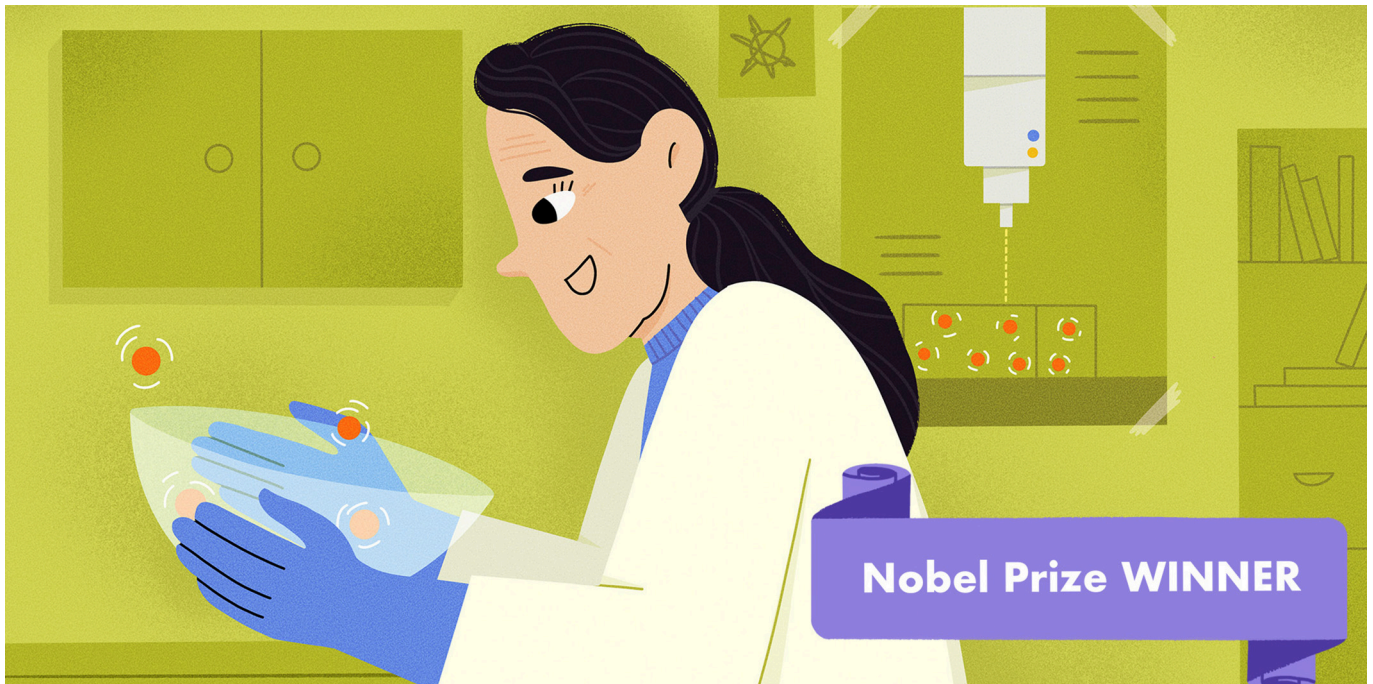
THE SAGOL NETWORK



קרן בשפחת

שעשוע

Shashua Family Foundation



איך לוכדים אטום? סיפורים על מדידת הזמן ועל אפשרויות שימוש בעתיד

Noa Segev^{1*} | David Wineland^{2*}

¹פרונטירז - מדע לצעירים, לוזאן, שוויץ
²המחלקה לפיזיקה, אוניברסיטת אורגון, יוג'ין, אורגון, ארה"ב

סוקרים צעירים

RYAN

גיל: 15



YARDEN

גיל: 13



מאמר זה מבוסס על ראיון בין שני הכותבים. חלקיקים קטנים, כמו פוטונים בודדים, אלקטרונים, אטומים ואטומים שנושאים מטען חשמלי (הנקראים יונים), חווים עולם שונה מאוד מהעולם כפי שהוא נגלה לנו בדרך כלל. בעוד שחיי היום-יום שלנו צפויים למדי, המשכיים ומוגדרים היטב, ב'עולם הקוונטי' – עולמם של חלקיקים בודדים או ספורים – יש הפתעות והתנהגויות בלתי צפויות ו'לא רגילות' רבות. בנוסף למורכבות, עולם החלקיקים הקטנים מציע אפשרויות מעניינות מאוד שאפשר ליישם על בעיות מעשיות. כדי לנצל את התכונות המדהימות של החלקיקים הקטנים, מדענים וחוקרים שונים פיתחו טכניקות מגוונות שנועדו לבודד ו'ללכוד' פוטונים, אלקטרונים, אטומים ויונים, ולהשפיע על התנהגותם. במאמר הזה ננסה לספק לכם הצצה אל חיהם המרתקים של החלקיקים הקטנים, נספר לכם על טכניקות העבודה איתם, ונציין איך אפשר לרתום את התנהגויותיהם הייחודיות לשימושים חדשים ומלהיבים בעתיד.

פרופסור דיוויד וינלנד זכה בפרס נובל לפיזיקה לשנת 2012, במשותף עם פרופסור סרז' הרוש, מהקולז' דה-פראנס, פריז, "עבור שיטות ניסוי פורצות דרך המאפשרות מדידה של מערכות קוואנטיות בודדות והשפעה עליהן".

חייהם של החלקיקים הקטנים

עולמם של האטומים והחלקיקים התת-אטומיים הוא עשיר ומרתק. בעולם הזה, אנחנו נתקלים בהרבה תופעות מוזרות ומגלים שאי אפשר להחיל את האינטואיציה היום-יומית שלנו לגבי הדרך שבה דברים עובדים על העולם האטומי והתת-אטומי. אחת התכונות המעניינות של העולם הזה, שבדרך כלל נקרא 'העולם הקוונטי', היא הדיסקרטיזציה (חוסר הרצף) המובחנת שלו. בניגוד לעולם היום-יומי שלנו, נראה שעולם החלקיקים אינו רציף – כאילו יש קפיצות פתאומיות בין מצבים שונים. לדוגמה, אנחנו יודעים שאלקטרונים הנמצאים באטומים יכולים לאכלס רק אזורים מסוימים סביב הגרעין, הנקראים **מסלולים אטומיים** [במכניקת הקוונטים, אנו לומדים שהאלקטרונים לא מתנהגים כמו חלקיקים נקודתיים שמקיפים במסלולם את הגרעין (כמו כוכבי הלכת המקיפים את השמש) ולכן כדי לתאר אותם, משתמשים ב'פונקציית גל', שמשמעותה למעשה שהמיקום שלהם מתפרש בחלל]. בכל אחד מהמסלולים האטומיים הללו, לאלקטרונים יש כמות מסוימת של אנרגיה, שנקראת **רמת אנרגיה**. כשאטום משחרר אנרגיה על ידי פליטת חלקיק אור הנקרא פוטון, נראה שהאנרגיה של אלקטרון בתוך האטום עוברת מיד מרמת אנרגיה התחתית לרמת אנרגיה נמוכה יותר. באופן דומה, כאשר אטום צובר אנרגיה על ידי קליטת פוטון, נראה שאלקטרון קופץ לפתע ממסלולו ההתחלתי למסלול סופי שבו רמת האנרגיה גבוהה יותר. למעשה, ה'קפיצות' אינן מיידיות, אך במקרים מסוימים הן אורכות זמן קצר מאוד, בסדר גודל של מיליארדית השנייה.

רמת האנרגיה (Energy level)

ערך אנרגטי דיסקרטי (בדד) אפשרי של מערכת קוונטית, כמו של אלקטרונים באטום.

מכניקת הקוונטים (Quantum Mechanics)

תיאוריה בפיזיקה המתארת התנהגות ואיכויות של אטומים ושל חלקיקים שונים, כמו גם של מערכות מקרוסקופיות יותר, כמו ויברציות (תנודות) של מתנדבים מכניים זעירים.

אלקטרונים (Electrons)

חלקיקי יסוד באטום בעלי מטען שלילי.

אלקטרודות (Electrodes)

מבנים העשויים בדרך כלל ממתכת המוליכים חשמל ויכולים לשמש ליצירת שדות חשמליים.

התיאוריה הפיזיקלית שמסבירה את העולם המופלא של האטומים והחלקיקים התת-אטומיים בצורה הטובה ביותר נקראת **מכניקת הקוונטים**. למרות שהיסודות של מכניקת הקוונטים הוצגו לפני כמעט מאה שנה, יש כמה חידות שעדיין לא פתרנו לגמרי, הנוגעות להתנהגות הבסיסית של החלקיקים – אבני הבניין של העולם החומרי. עם זאת, פיתחנו טכניקות רבות שעוזרות לנו להבין טוב יותר את התנהגותם של החלקיקים ולהשפיע עליהם. בהמשך המאמר נספר לכם בקצרה על שתי טכניקות כאלה – האחת מטרתה ללכוד חלקיקים (אפילו חלקיק בודד) במיקום מסוים, והשנייה מיועדת להאט את תנועתם, או לקרר אותם.

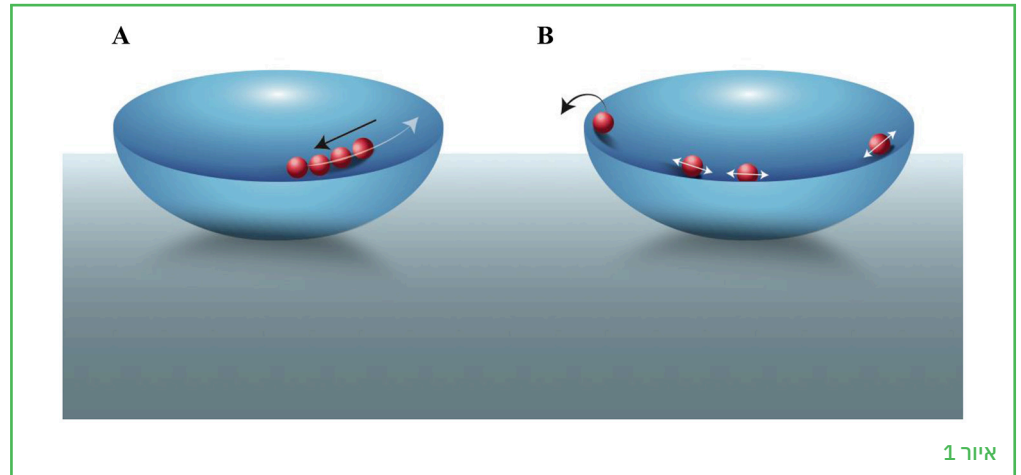
איך לוכדים הרבה חלקיקים?

חלקיקים נוטים לנוע הרבה במרחב וכשאנחנו עובדים איתם, אנחנו בדרך כלל רוצים 'ללכוד' את החלקיקים במיקום מסוים. אנחנו חוקרים לעיתים קרובות **אלקטרונים** ויונים אטומיים, שמושפעים משדות חשמליים. כשמסדרים **אלקטרודות** (מוליכים חשמליים) במבנים גיאומטריים מסוימים ומפעילים עליהן מתח חשמלי, ניתן לייצר שדות חשמליים הלוכדים את האלקטרונים ואת היונים במיקום מסוים [1, 2]. תוכלו לחשוב על כך כמו על גולות בקערה: החלקיקים שלנו הם הגולות, והשדות החשמליים מהווים את הקערה (איור 1A). מרכז הקערה הוא כמו מרכז ה'מלכודת' של השדה החשמלי: אם החלקיקים

זזים מתחתית המלכודת (או הקערה), הם 'נדחפים' חזרה לכיוון המרכז. בדומה לכוח הכבידה שמשאיר את הגולות בתחתית הקערה, השדה החשמלי כולא את החלקיקים ליד מרכז המלכודת. הפרופסורים וולפֶּנְגֶּ פֶּאול וְהַנְס דֶּמְלֵט זכו יחד בפרס נובל לפיזיקה לשנת 1989 על פיתוח טכניקה של מלכודות יונים ואלקטרונים [1, 2].

איור 1

לכידת חלקיקים – אנלוגיית הקערה והגולות. ניתן לחשוב על האלקטרונים הנעים ב'מלכודת' השדה החשמלי כעל גולות בקערה. (A) כאשר החלקיקים מתרחקים ממרכז 'קערת' השדה המגנטי (חץ לבן), הם נדחפים חזרה לכיוון המרכז (חץ שחור), כך שהם נשארים לכודים בתוך הקערה. (B) אם בכוונתנו ללכוד חלקיק בודד, אנחנו יכולים ללכוד תחילה מספר חלקיקים, ולאחר מכן להפעיל על 'קערה' שדות חשמליים מתנוודדים שמגבירים את תנועת החלקיקים. כך אנחנו 'מסלקים' חלקיקים מהקערה (חץ שחור), אחד אחרי השני, עד שנשאר בה רק חלקיק אחד [3].



איור 1

איך לוכדים חלקיק בודד?

לעיתים אנחנו צריכים לשלוט בחלקיקים בצורה מדויקת מאוד. לפעמים נוח יותר לעבוד עם קבוצות חלקיקים, גם משום שנוח יותר ללכוד חלקיקים רבים יחד, וגם משום שקל יותר למדוד אותות (הזרמים החשמליים הנוצרים באלקטרודות עקב תנועת המטענים החשמליים) גדולים יותר, המיוצרים על ידי כמה חלקיקים יחד, בהשוואה לאותות קטנים יותר של חלקיק בודד. עם זאת, כשעובדים עם כמות של חלקיקים, קשה יותר לשלוט בהם באותה רמת דיוק שבה אנחנו יכולים לשלוט בחלקיק אחד, כמו שקל יותר להשיג על ילד אחד בכיתה, לדוגמה, מאשר על כמה ילדים בו-זמנית. אתם ודאי יכולים לתאר לעצמכם שהתרחיש השני מאתגר הרבה יותר.

אנחנו יכולים לשלוט במהירותו של חלקיק בודד בדיוק רב, כמעט עד לכדי עצירה מוחלטת של תנועתו. עם זאת, קשה יותר לשלוט באותה רמת דיוק במהירותם של חלקיקים רבים בקבוצה (כאשר החלקיקים בקבוצה מתנגשים, רמות האנרגיה הפנימית שלהם יכולות להשתנות בצורה לא מבוקרת). מסיבה זו, אם אנחנו צריכים להשיג שליטה ודיוק גבוהים מאוד (כמו שנדרש בשעונים האטומיים, כפי שתראו בהמשך), עלינו לעבוד לפעמים עם חלקיקים בודדים, כדי לשלוט ברמת דיוק גבוהה בתנועת החלקיק וכדי למזער טעויות שעלולות להתרחש כשעובדים עם חלקיקים רבים [3].

כדי ללכוד חלקיק טעון אחד, אנחנו יכולים ללכוד תחילה כמה חלקיקים, כפי שמוצג באיור 1A. לאחר מכן, אנחנו יכולים להפעיל שדה חשמלי מתנוודד על החלקיקים, כך שמדי פעם חלקיק 'עף' מהמלכודת. אם נחזור לאנלוגיית הקערה והגולות שלנו, אתם יכולים לדמיין שאנחנו מגבירים את תנועת הגולות שבקערה, עד שגולה אחת 'קופצת' מעבר לשפת הקערה (איור 1B). בכל פעם שחלקיק 'קופץ' מהקערה, אנחנו רואים במדידות שלנו הפחתה פתאומית ודיסקרטית של סך הזרם החשמלי המתנוודד שנוצר באלקטרודות (כמו

ב-[3]). אנחנו חוזרים על התהליך הזה עד שהזרם של המערכת שווה לזרם של חלקיק בודד. כך אנחנו יודעים שנשארו רק עם חלקיק אחד במלכודת [1]. לאחר מכן, אנו יכולים לחקור את המאפיינים שלו, ו/או לרתום את המאפיינים המוכרים לנו לטובת שימושים ספציפיים [1, 2]. כשאנחנו עובדים עם יונים אטומיים מסוימים, ביכולתנו להקרין עליהם אור לייזר שמתפזר. סך הפיזור שאנחנו רואים הוא פרופורציונלי למספר היונים, וכשאנחנו בודקים אותו אנחנו יכולים לדעת מתי יש לנו יון בודד במלכודת.

איך מקררים אטומים באמצעות קרני לייזר?

עוד טכניקה חשובה המאפשרת לשלוט בחלקיקים היא האטה או קירור שלהם לטמפרטורות נמוכות מאוד באמצעות לייזרים, עד שהם בקושי זזים. טכניקה זו נקראת **קירור באמצעות לייזר**. כפי שלמדנו, האלקטרונים נעים סביב הגרעין רק ברמות אנרגיה מסוימות. כאשר פוטון מתקרב לאטום, הוא נבלע באטום רק אם יש לו בדיוק את כמות האנרגיה המתאימה להעברת אלקטרונים מרמת אנרגיה אחת לאחרת; אחרת, האור פשוט עובר דרך האטום. אולי אתם יודעים שהאנרגיה שהפוטונים נושאים קשורה ישירות לתכונה אחרת של אור, הנקראת תָּדָר (מספר המחזורים שגל משלים תוך שניה אחת), כך שלפוטונים בעלי אנרגיה גבוהה יותר יש תדרים גבוהים יותר, ולהיפך (מידע נוסף, באנגלית, על תדר ואנרגיה, זמין כאן).

כאשר אטום נע נגד כיוון האור, כמו זה שבקרן הלייזר, תדר האור שחווה האטום הוא בעל תדירות גבוהה יותר ולכן הוא 'אנרגטי יותר' בהשוואה למקרה שבו האטום מתרחק ממקור האור (איור 2). התופעה הזו נקראת **אפקט דופלר**. אם נכוון את תדר הלייזר מעט מתחת לתדר (האנרגיה) הנדרש למעבר בין שני מסלולי אלקטרונים כשהאטום במנוחה, אז כשהאטום ינוע לכיוון הלייזר, הוא יחווה את תדר הלייזר כגבוה יותר והאור יבלע בו (האטום האדום באיור 2). בליעת האור מאטה את האטום בשל הִתְנַעַע של הפוטון המועבר לאטום. מפגש זה מפחית את המומנטום של האטום, כלומר – מאט את מהירותו. דמיינו שני שחקני רוגבי הרצים אחד לעבר השני, שההתקלות ביניהם מאטה את תנועתם. מצד שני, אם האטום נע הרחק מהלייזר (האטום הירוק באיור 2), התדר של קרן הלייזר שהאטום חווה נמוך יותר, והסבירות שהפוטון של קרן הלייזר ייבלע באטום יורדת. בעקבות זאת, האטום ממשיך לנוע בערך באותה מהירות (למידע נוסף, באנגלית, על קירור באמצעות לייזר, ראו סרטון זה). ההשפעה של ההפרש הזה, בין תנועת האטום לכיוון הלייזר לעומת התנועה שלו הרחק מהלייזר, משמעה שיש לנו דרך להאט אטום שנע בכיוון מסוים (לכיוון הלייזר). כשאנחנו משלבים מספר לייזרים המוקרנים מכיוונים שונים, אנחנו יכולים להאט את האטומים הנעים בכל הכיוונים.

שעונים אטומיים: איך יודעים מה השעה בצורה המדויקת ביותר?

שעונים כל כך נפוצים בחיי היום-יום שלנו שאנחנו כמעט ולא עוצרים לחשוב על סוגיות בסיסיות, כמו איך מודדים זמן ומה עלול להגביל את הדיוק של מדידת הזמן. מדענים ומהנדסים במעבדות דוגמת המעבדה של חטיבת הזמן והתדר של המכון הלאומי לתקנים ולטכנולוגיה בארה"ב (NIST), עוסקים בסוגיות הללו כל היום! המשימה שלהם היא להמשיך ולשפר את רמת הדיוק של השעונים, ולמדוד את הזמן בצורה יותר ויותר מדויקת. כמו רוב

קירור באמצעות לייזר (Laser Cooling)

טכניקה להאט תנועתם של אטומים ושל יונים באמצעות קרני לייזר.

פוטונים (Photons)

חלקיקי אור שנושאים כמות ספציפית ודיסקרטית של אנרגיה, התואמת את התדר שלהם. רעיון זה הוצע על ידי מקס פֶּלאַנק ואומץ לאחר מכן על ידי אלברט איינשטיין.

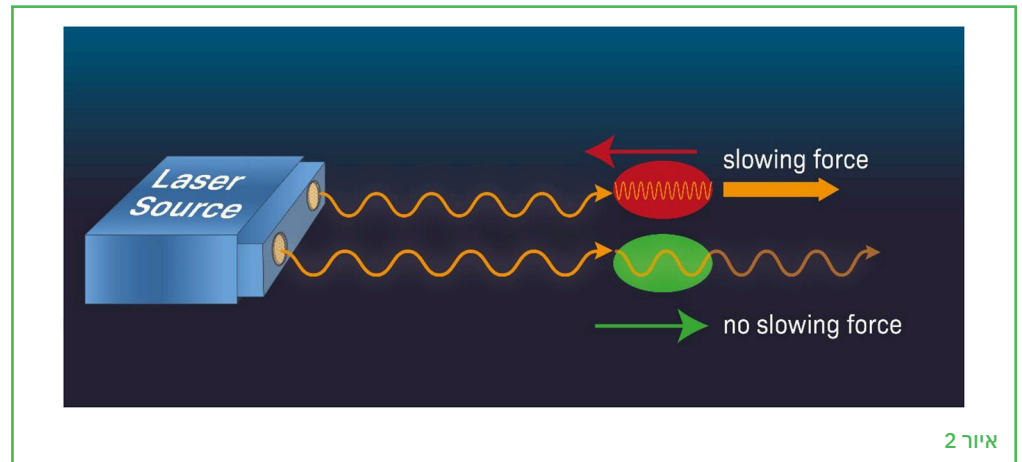
תְּנַעַע (מוֹמֶנְטוּם) (Momentum)

גודל פיזיקלי המוגדר כתוצר של מסת החלקיק ושל מהירותו. ככל שיש לחלקיק יותר תנע, כך הכוח שהוא יכול להפעיל על חלקיקים אחרים גדול יותר.

איור 2

קירור באמצעות לייזר.

כאשר אטום נע נגד קרן לייזר (אדום) הוא חווה תדר גבוה יותר של הקרן (כלומר, פוטונים בתדר גבוה יותר). אם אנחנו מכוונים את תדר הלייזר מעט מתחת לתדר הספציפי שנבלע באטום כשהוא במצב מנוחה, אז לפי אפקט דופלר, האטום שנע נגד כיוון הקרן יתקל בפוטונים בתדר גבוה יותר, יבלע את אור הלייזר ויאט את הקצב. (דמיינו שפוטון הלייזר הוא כמו עצם קשה שנע לעבר האטום וכשהם מתנגשים, האטום מאט). לעומת זאת, אטום שנע באותו הכיוון של קרן הלייזר (ירוק) יבלע את פוטוני הלייזר רק במידה מוגבלת, שכן תדירות הפוטונים נמוכה מהתדר שנבלע באטום בצורה מרבית. לכן, האטום ימשיך לנוע מבלי שמהירותו תשתנה באופן ניכר. כאשר אנחנו משלבים כמה קרני לייזר המוקרנות מכיוונים שונים, אנחנו יכולים להאט את האטומים למהירויות נמוכות מאוד בכל כיווני התנועה שלהם.



איור 2

הפיזיקאים הניסיוניים, המדענים האלה הם ממש כמו בלשים: הם מזהים בקפידה את כל הגורמים החשובים וההשפעות הסביבתיות שבגללן אנחנו לא יכולים לדייק לגמרי בקביעת הזמן ואז הם מנסים להפחית את ההשפעות הללו ככל הניתן, כדי לשפר ללא הרף את רמת הדיוק של מדידת זמן. 'מדעני השעונים' האלה עובדים על המשימה הזו מאז שנות ה-50 של המאה ה-20; מאז שהציגו את השעונים האטומיים הראשונים (למידע נוסף על ההיסטוריה ודרך הפעולה של שעונים אטומיים, ראו מאמר זה).

באופן כללי, כדי למדוד מרווחי זמן, אנחנו מתייחסים למקור תדר מסוים וסופרים את המחזורים שלו. אנחנו יכולים לספור, למשל, תנודות של מטוטלת מכנית, או של מתנד גבישי קוורץ פִּיִּזְאֵלְקְטְרִי (מכשיר שנמצא בטלפונים סלולריים. התנודות המכניות שלו נגרמות על ידי המתח החשמלי המופעל עליו). אם אנחנו יודעים מהו התדר של המקור שלנו, אפשר לספור כמה מחזורים הושלמו במרווח זמן מסוים (כלומר, המִשְׁךָ בין שתי נקודות בזמן), ומכך להסיק כמה זמן עבר. אנחנו יודעים כמה זמן עבר על ידי ספירה של כמה מחזורים הושלמו במרווח זמן מסוים (כלומר, משך בין שתי נקודות זמן). לדוגמה, אם אנחנו יודעים שהתדר של המקור שלנו הוא 100 הרץ (מחזורים לשנייה), אפשר להסיק שמשך כל מחזור הוא מאית (0.01) השנייה. ככל שתדר המקור גבוה יותר, אנחנו יכולים להגדיר את מרווחי הזמן בצורה מדויקת יותר.

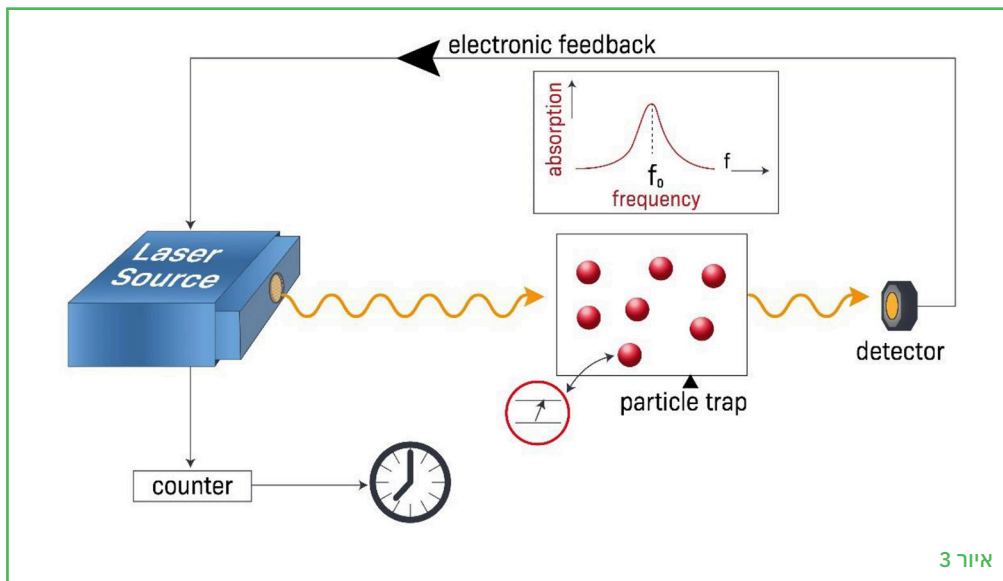
כשאנחנו משתמשים בשעונים אטומיים כמקור התדר שלנו, ביכולתנו למדוד מרווחי זמן בצורה מדויקת מאוד. כלומר, במקום להשתמש בתדר נמוך של מטוטלת מכנית או בתדר של מתנד גבישי קוורץ, אפשר להשתמש בתדר גבוה מאוד, המתאים לתדר של אותם פוטונים הגורמים למעברים בין רמות אנרגיה דיסקרטיביות (מופרדות) של אטומים.

לדוגמה, אנחנו יכולים לשדר קרן לייזר על אטומים שהושמו במצב האנרגיה האלקטרונית הנמוכה ביותר שלהם, ולראות כמה מקרן הלייזר נבלעת בהם. כאשר קרן הלייזר נבלעת בצורה מקסימלית, אנחנו יודעים שהתדר של קרן הלייזר תואם את תדר הפוטונים. משמעות הדבר היא שאותו תדר תואם להפרש האנרגיה בין שתי רמות האנרגיה האטומית. אם קרן הלייזר לא נבלעת בצורה מקסימלית, נשנה מעט את התדר שלה עד למקסימום הקליטה, ונוודא את קיומו של תנאי זה. לאחר מכן, נספור את המחזורים של תנודת הלייזר וכך נוכל לקבוע במדויק את מרווחי הזמן (איור 3).

איור 3

עקרונות השעון האטומי.
 כאשר אטומים לכודים מקוררים (הכדורים האדומים) סופגים בצורה מקסימלית קרן לייזר, המשמעות היא שתדר הלייזר שווה לתדר הפוטונים הנדרש ל'הקפצה' של אלקטרונים מרמת אנרגיה נמוכה לרמת אנרגיה גבוהה יותר (התרשים שבעיגול האדום). אנחנו מכוונים את תדר הלייזר באמצעות מערכת המספקת משוב אלקטרוני, עד שקרן הלייזר נבלעת בצורה מקסימלית באטומים. לאחר מכן אנחנו משתמשים במכשיר שסופר כמה מחזורים קרן הלייזר משלימה. אז אנחנו משתמשים בתוצאה, יחד עם תדר המעבר של האטום, כדי לחשב כמה זמן עבר. מכיוון שללייזר יש תדר גבוה מאוד, הזמן לכל מחזור תנדודות הוא קצר מאוד, לכן אנחנו יכולים למדוד מרווחי זמן ברמת דיוק גבוהה מאוד.

Laser source = מקור הלייזר
 Particle trap = מלכודת חלקיקים
 Absorption = בליעה
 Frequency = תדר
 Detector = גלאי
 Electronic feedback = משוב אלקטרוני
 Counter = מונה.



איור 3

נעשה שימוש בשעונים האטומיים בלוויינים, לדוגמה, כדי לאתר את מיקומכם דרך מערכת האיכון (GPS) שבטלפונים החכמים. עושים זאת על ידי מדידה באמצעות שעונים אטומיים מסונכרנים של הזמן שלוקח לאור (מהירות האור היא נתון ידוע) לנוע מהלוויין לטלפונים החכמים שלכם. אז, ניתן להשתמש בתוכנה כדי לחשב את המרחק המדויק שלכם מהלוויין. באמצעות רשת של לוויינים מסונכרנים בזמן, ניתן לקבוע את המיקום התלת ממדי שלכם. השעונים האטומיים בלוויינים חייבים להיות מדויקים מאוד, שכן טעויות קטנות מאוד במדידת הזמן שלהם, אפילו בקנה מידה של מיליונית השנייה, גורמות לשגיאות גדולות של מאות מטרים בקביעת מיקומכם באמצעות מערכת האיכון.

במשך שנים רבות, השעונים האטומיים הטובים ביותר התבססו על מעבר מסוים המתרחש ביסוד כימי ספציפי (מעבר גלי המיקרו ה'על-דקים' (hyperfine) באטומים ניטרליים של היסוד צסיום, בעלי תדר של כ-9.2 גיגה-הרץ, שהם כ- 9.2×10^9 הרץ). בשנים האחרונות, תקני התדר המדויקים ביותר מתבססים על מעברים שיש להם תדרים קרובים לאלו של גלי אור התואמים לצבעי האור שאנחנו יכולים לראות – בסביבות 10^{15} מחזורים לשנייה [4] (למידע נוסף על שעונים אטומיים אופטיים, ראו מאמר זה). חוסר הדיוק בתדרים אלה עקב הפרעות סביבתיות הוא בערך 1 חלקי 10^{18} , מה שאומר ששעונים המבוססים על מעברים אלה 'יזייפו' בפחות משנייה על פני פרק זמן שקרוב לגיל היקום (בערך 13.7 מיליארד שנים).

ניתן לרתום את הטכניקות המתקדמות של קירור באמצעות לייזר ליישומים אפשריים חשובים. אחד מהם נקרא מְחֻשָּׁב קוונטי. ביישום זה, משתמשים במאפיינים הקוונטיים של אטומים ושל יונים או באמצעים מְקוֹרְסְקוֹפִיִים כדי לבצע סוג מסוים של חישובים מורכבים בעילות רבה יותר מאשר במחשבים דיגיטליים 'רגילים'. כדי להבין קצת יותר תוכלו לעיין בנספח שבהמשך.

המלצות למוחות צעירים

מבחינתנו, העבודה שאנחנו עושים היא יותר כמו תחביב, כי גם אם לא היינו עוסקים במקצוע הזה, כנראה שהיינו מתעניינים באותם התחומים. זה מה שאנחנו מאחלים גם לכם. אנחנו

מאמינים שכדאי לכם למצוא משהו שאתם אוהבים באמת – כך תהיו מוכנים לעבוד קשה ולהשקיע בו זמן רב, וסביר להניח שתזכו להצלחה. גם אם תשנו את דעתכם לגבי מה שאתם אוהבים או לגבי מה שמעניין אותכם, זה בסדר. כמובן שאין צורך לבזבז את הזמן על משהו שלא כל כך קשור למה שאתם אוהבים. לדעתנו חשוב גם לראות את המציאות כפי שהיא ולהתאים את החלטותיכם לרצונותיכם בעת הצורך.

לאילו מכם שבחרים בקריירה מדעית, חשוב גם לדעת שצריך סבלנות ויכולת התמדה. במדע, ובמיוחד במחקר מדעי, מאמצים לרוב לא יניבו פרי באופן מיידי. לוקח זמן לפתח את הידע והמיומנויות הנדרשות לביצוע מחקר באיכות גבוהה, ולהגיע לתובנות חדשות על העולם. עליכם לפתח יכולת לעמוד בקשיים ולהתמיד בעבודה גם כשהדברים לא קורים כפי שתכננתם. אם תעשו זאת, בסופו של דבר עבודתכם תניב פרי ותוכלו ליהנות מנפלאות הגילוי.

אנחנו רוצים גם להדגיש שלדעתנו, אין זה נכון לבחור בקריירה או במסלול מסוימים רק כי אתם מצפים להרוויח מהם כסף. לא סביר שתהיו מאוד מרוצים או שתצליחו במיוחד אם תתמקדו רק בצורך הכלכלי. בדומה לכך, אם תשקיעו את מרצכם במרדף אחר פרסים, סביר להניח שגם זו לא תהיה דרך מוצלחת במיוחד. אנחנו ממליצים לבחור משהו שאתם אוהבים ולהשקיע בעבודה קשה שתקדם אתכם לעבר מטרה משמעותית, במקום להתמקד בשכר או בהכרה מצד הסביבה.

לסיום, יש לנו עצה לאלו מבינכם שמתכוונים ללמוד תואר אקדמי. אם תמשיכו ללימודי התואר השני והשלישי, ישבצו אתכם לעבודה על פרויקט מסוים. מניסיונו, עדיף תמיד לא להתמקד בנושא המדויק שעליו אתם עובדים, אלא גם 'להתפזר' קצת ולקרא חומרים קשורים, אך רחבים יותר. כך בדיוק עלה במוחו של דיוויד הרעיון לקירור באמצעות לייזר – הוא קרא מאמרים נוספים בנושאים שלא היו קשורים ישירות לפרויקט שלו באותה תקופה. בסופו של דבר, אותו הרעיון הפך לאבן דרך מרכזית בקריירה המדעית שלו.

נספח: פיתוחים ושימושים עתידיים

הביצועים של השעונים האטומיים ימשיכו להשתפר. יש לחדד את התייחסותנו לשינויים בתדר עקב הפרעות סביבתיות רבות המשפיעות על האטומים, כגון שדות חשמליים ומגנטיים מקומיים מזדמנים. ישנן שתי השפעות נוספות שעלינו לכלול בהשוואות בין השעונים. מקורן בתורת היחסות של איינשטיין והן צורות נפרדות של מה שנקרא 'הרחבת זמן' – זוהי תופעה של האטת הזמן במערכת ייחוס אחת ביחס לאחרת.

ראשית, איינשטיין לימד אותנו שבמערכת ייחוס שנעה ביחס אלינו, לדוגמה, המערכת הקשורה לאטום או ליון הנמצאים בתנועה, הזמן נע לאט יותר בהשוואה אלינו, כצופים נייחים במעבדה. הסחה (סטייה) זו היא פרופורציונלית לאנרגיית התנועה הממוצעת של היונים, כך שאחד היתרונות של קירור באמצעות לייזר הוא שאנחנו יכולים להפחית את התזוזה בפקטור של כמיליון בהשוואה ליונים או לאטומים בטמפרטורת החדר.

העיקרון השני של הרחבת זמן שאותו למדנו מאיינשטיין הוא שהזמן נע לאט יותר בנוכחות כוח הכבידה [הידוע בתור 'הסחה כבידתית פוטנציאלית לאדום' [5-7]]. אין לכך השפעה גדולה על החוויה היום-יומית הרגילה שלנו, כפי שניתן להמחיש בדוגמה הבאה: נניח שאת או אתה, הופרדתם בלידתכם מתאום או תאומה. אתם חיים בגובה פני הים; התאומה או התאום שלכם חיים בגובה של 1.6 ק"מ מעל פני הים (בבולדר, קולורדו שבארה"ב, לדוגמה). אחרי 80 שנה, התאומה או התאום שלכם יהיו מבוגרים מכם בכ-0.001 שניות בלבד.

זוהי כמובן השפעה זניחה מבחינת פעילויות אנושיות טיפוסיות, אך ניתן לצפות בה בשעונים מדויקים ויש לקחת אותה בחשבון כשמשווים בין שעונים במקומות שונים, כמו במקרה של ניווט באמצעות GPS.

הנה דוגמה פשוטה של השפעה זו: במכון הלאומי לתקנים וטכנולוגיה בבולדר, קולורדו, ערכו השוואה בין שני שעונים נפרדים, המבוססים על אותו מעבר אטומי בין [5]. תחילה, שני השעונים מוקמו באותו גובה, אך במרחק של כמה מטרים אחד מהשני. הסטייה ביחס התדרים של שני השעונים הייתה שווה ל-11 חלקי 10^{18} . לאחר מכן, הגביהו את אחד השעונים ב-33 ס"מ ומדדו שוב את יחס התדרים של שני השעונים. תדר השעון המוגבה עלה בכ-4 חלקי 10^{17} , קרוב לתוצאה הצפויה.

דוגמאות דרמטיות אף יותר של ההסחה הכבידתית הפוטנציאלית לאדום הוצגו לאחרונה על ידי שתי קבוצות המשתמשות באטומים ניטרליים שבהם ההסחה הכבידתית לאדום נצפתה בקנה מידה של מילימטרים [6, 7].

בנוסף לשעונים משופרים, עוד שימוש פוטנציאלי חשוב המבוסס על שליטה ומניפולציה של מערכות קוונטיות בודדות הוא עיבוד מידע קוונטי, הכולל **חישוב קוונטי** (חישובים המבוצעים על ידי מחשב באמצעות אלמנטים קוונטיים) וסימולציה קוונטית (סימולציות ממוחשבות המשתמשות באפקטים קוונטיים להבנת תופעות פיזיקליות). למרות שנושא זה הוא מעבר למסגרת המאמר, אנחנו יכולים לתאר לכם בקצרה את התחום החשוב הזה ואת כיווני ההתפתחות העתידיים שלו.

לשם כך, ראשית עלינו להציג לכם עוד תופעה מוזרה בעולם החלקיקים הקוונטיים, הנקראת *סופרפוזיציה*. סופרפוזיציה מתייחסת לעובדה שחלקיקים יכולים לייצג שתי רמות אנרגיה שונות בו-זמנית. נשתמש שוב בהשוואה בין היון הלכוד הבודד לבין הגולה בקערה. אנחנו יכולים לעורר את תנועת היון עם שדה חשמלי מתנווד וליצור מצב 'רגיל' שבו הגולה מתגלגלת קדימה ואחורה בתוך הקערה, למשל בין הצד השמאלי לבין צד הימני שלה. עם זאת, באמצעות הכלים הקוונטיים שלנו, אנחנו יכולים גם ליצור מצב שבו בזמנים מסוימים הגולה נמצאת בו-זמנית גם בצד שמאל וגם בצד ימין של הקערה – כלומר, במצב 'סופרפוזיציה'. זה מאוד מנוגד לאינטואיציה ולא הגיוני בעולם היום-יומי ה'רגיל' שלנו, אבל זה העולם שבו חיים מדעני הקוונטים.

אם נרחיב את הרעיון הזה ונחיל אותו על רמות האנרגיה של אטום בודד, נוכל ליצור מצב סופרפוזיציה שבו האטום נמצא בו-זמנית במצב האנרגיה הנמוך והגבוה יותר שלו. בפועל, קל יחסית לעשות זאת. בעבר דיברנו על יון אטומי בודד שסופג פוטון בודד ועובר מרמת האנרגיה הנמוכה שלו לרמת אנרגיה גבוהה יותר. מסתבר שכאשר קרן הלייזר שלנו מורכבת

מפוטונים רבים הפרוסים בחלל לכל הכיוונים בניצב לכיוון הקרן, ואנחנו מפעילים את הלייזר למשך זמן מסוים, אנחנו יכולים לממש מצב בו האטום רק חצי מְעוֹרָר (בעל אנרגיה גבוהה יותר). כלומר, לאחר שמכבים את קרן הלייזר, האטום נמצא בסופרפוזיציה של רמת האנרגיה האלקטרונית הנמוכה שלו ורמת האנרגיה הגבוהה שלו. כפי שניתן לראות בדוגמה זו, סופרפוזיציה פירושה שחלקיק יכול להתקיים בו-זמנית במספר מצבים בכל רגע נתון.

תחום החישוב הקוונטי מבוסס בחלקו על סופרפוזיציה של שני מצבים של מערכת קוונטית, כמו היונים האטומיים בדוגמה שלעיל. אולי אתם יודעים שמחשב רגיל מורכב מיחידות בסיסיות הנקראות 'ביטים'. הביטים יכולים להיות באחד משני מצבים, אנחנו להם קוראים '0' ו-'1'. כאשר משלבים את המערכת הדואלית הזו עם מערכות דואליות דומות, ניתן לבצע את כל החישובים של מחשב רגיל. הרעיון של המחשב הקוונטי הוא שכל יחידה בסיסית, המכונה 'קיוֹבִּיט' (קיצור של ביט קוונטי) יכולה להיות בסופרפוזיציה של מצבים, כלומר, במספר מצבים בו-זמנית.

כדי לייצג את המצב של קיוֹבִּיט כסופרפוזיציה של המצבים הקוונטיים '0' ו-'1', אנחנו משתמשים לעתים קרובות בסימונים ' $|1\rangle$ ' ו- ' $|0\rangle$ '. כך אנחנו מבטאים את מצב הסופרפוזיציה הכללית של הקיוֹבִּיט: $(\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle)$, כאשר $|\alpha|^2$ היא ההסתברות למדוד קיוֹבִּיט במצב '0', ו- $|\beta|^2$ היא ההסתברות למדוד קיוֹבִּיט במצב '1'. כאשר ההסתברויות הללו שוות, אנחנו קוראים לזה 'סופרפוזיציה שווה של מצבים'.

במסגרת זו, אחד ממצבי הסופרפוזיציה האפשריים של הקיוֹבִּיט יכולה להיות

$$|\alpha|^2 = |\beta|^2 = \frac{1}{2}, \text{ כאשר } \frac{1}{\sqrt{2}}|0\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}}|1\rangle$$

כעת, בואו נראה מה קורה במערכת גדולה יותר. אם אנחנו בוחנים מערכת 'רגילה' של שני ביטים כאשר כל אחד מהם יכול להיות במצב '0' או '1', אנחנו יכולים לייצג סכום של $2^2 = 4$ מספרים. המספרים הללו הם: 00, 01, 10, ו-11. המצב הכללי של מערכת מקבילה של שני קיוֹבִּיטים הוא $(\delta|11\rangle + \gamma|10\rangle + \beta|01\rangle + \alpha|00\rangle)$, בעוד שההסתברות למדוד את המצבים $(|11\rangle, |10\rangle, |01\rangle, |00\rangle)$ היא $|\delta|^2, |\gamma|^2, |\beta|^2, |\alpha|^2$, בהתאמה. אחת הדוגמאות לסופרפוזיציה של ארבעת המצבים תהיה המצב $(\frac{1}{2}|11\rangle + \frac{1}{2}|10\rangle + \frac{1}{2}|01\rangle + \frac{1}{2}|00\rangle)$. עם הסתברות מדידה של $\frac{1}{4} = (\frac{1}{2})^2$ עבור כל מצב. כפי שאתם יכולים לראות, סופרפוזיציה של מערכת של שני קיוֹבִּיטים מכילה (או כפי שאנחנו אומרים, 'מאחסנת'), ארבעה (2^2) מספרים בעלי שני ביטים בו-זמנית. בניגוד לכך, מערכת 'רגילה' של שני ביטים יכולה לאחסן רק מספר אחד בזמן נתון (00, 01, 10, או 11).

כאשר מחילים זאת על מערכות גדולות אף יותר, אפשר לראות שמערכת 'רגילה' המכילה מספר ביטים מסוים (הנקראת מערכת n-bit), יכולה לאחסן מספר מסוים (n) של זוגות ביטים (המורכבים מביטים של '0' ושל '1'). עם זאת, סופרפוזיציה של מספר מסוים (n) של קיוֹבִּיטים, יכולה לאחסן 2^n מספרים בעלי n ביטים בבת אחת (כלומר פי 2^n יותר מספרים בהשוואה למערכת 'רגילה' באותו גודל). זה מעיד על כך שכאשר אנחנו מבצעים פעולה על אחד מהקיוֹבִּיטים בסופרפוזיציה שלנו, של n-qubit, אנחנו מבצעים את הפעולה על כל 2^n המצבים של n קיוֹבִּיטים בו-זמנית. כלומר, מחשב קוונטי יכול לאחסן ולעבד כמות הרבה יותר

גדולה של מידע מאשר מחשב 'רגיל' באותו גודל. זוהי דוגמה ל'קנה מידה מעריכי' (כלומר, שמעלים אותו בחזקה). חשבו על ההפרש העצום! אם יש לנו 300 קיוביטים למשל, אנחנו יכולים לאחסן בו-זמנית 2^{300} מספרים בעלי 300 ביטים. זיכרון 'רגיל' בגודל כזה ידרוש יותר חלקיקים משקיימים ביקום! קל יחסית ליצור מצב כזה עם יונים לכודים, אך קשה הרבה יותר ליצור שערים לוגיים שימושיים למערכת בגודל כזה. [יישום של שערים לוגיים קוונטיים הוא מעבר לתחום של מאמר זה, אך אתם יכולים לקרוא על כמה מהרעיונות הבסיסיים ב-[[8]].

באופן עקרוני, מחשבים קוונטיים יכולים להיות הרבה יותר יעילים ומהירים ממחשבים 'רגילים' עבור בעיות מסוימות, ויכולים לפתור בעיות שהמחשבים הקונבנציונליים הנוכחיים אינם מסוגלים לפתור. מעבר לפירוק יעיל של מספרים לגורמים (כפי שהציע פיטר שור), אחד השימושים הצפויים של המחשבים הקוונטיים הוא היכולת לדמות דינמיקה או התנהגויות של מערכות קוונטיות מורכבות. באמצעותו יהיה ניתן, לדוגמה, לדמות את פעולתן של מולקולות בחומר כימי המיועד לשמש בטיפולים רפואיים ולחקור אותן באמצעות הדמיות ממוחשבות ללא צורך לסנתז אותן במעבדה. סימולציות דומות יכולות גם ללמד אותנו דברים חדשים על פיזיקה, או לפתור בעיות פיזיקליות מסובכות שמחשבים 'רגילים' לא יכולים לפתור.

אנשים רבים תוהים מתי ייבנה המחשב הקוונטי הראשון. התשובה היא שכבר יש לנו מחשבים קוונטיים, אבל נכון לעכשיו, מחשבים 'רגילים' מסוגלים לפתור את הבעיות שגם הם פותרים (למרות שאולי לא באותה יעילות), או שהבעיות שהם פותרים אינן מעניינות מבחינה פרקטית. כנראה שבנייה ושיפור של המחשבים הקוונטיים יתרחשו בהדרגה – המחשבים הקוונטיים הראשונים יוכלו לפתור רק בעיות 'מעניינות' פשוטות, אך ככל שהתחום יתקדם, הם יוכלו לעשות דברים מורכבים יותר. אולי בעשר השנים הבאות נוכל לרתום את המחשבים הקוונטיים לדברים שימושיים, כמו לגילוי של משהו שלא ידענו קודם, או להדמיית מערכת מעניינת שיהיה לה יישום מעשי. יש לנו למה לצפות!

חומרים נוספים

כאן תוכלו לקרוא את תַּעֲתִיק הריאיון שנערך בין פרופ' דיוויד וינלנד לבין נועה שגב.

תודות

ברצוננו להודות לשרון עמלני עבור האוירים במאמר זה.

מקורות

1. Paul, W. 1990. Electromagnetic traps for charged and neutral particles. *Rev. Modern Phys.* 62:531. doi: 10.1103/RevModPhys.62.531
2. Dehmelt, H. 1990. Experiments with an isolated subatomic particle at rest. *Rev. Modern Phys.* 62:525. doi: 10.1103/RevModPhys.62.525
3. Wineland, D., Ekstrom, P., and Dehmelt, H. 1973. Monoelectron oscillator. *Phys. Rev. Lett.* 31:1279. doi: 10.1103/PhysRevLett.31.1279

4. Diddams, S. A., Bergquist, J. C., Jefferts, S. R., and Oates, C. W. 2004. Standards of time and frequency at the outset of the 21st century. *Science*. 306:1318–24. doi: 10.1126/science.1102330
5. Chou, C. W., Hume, D. B., Rosenband, T., and Wineland, D. J. 2010. Optical clocks and relativity. *Science*. 329:1630–3. doi: 10.1126/science.1192720
6. Bothwell, T., Kennedy, C. J., Aeppli, A., Kedar, D., Robinson, J. M., Oelker, E., et al. 2022. Resolving the gravitational redshift across a millimetre-scale atomic sample. *Nature*. 602:420–4. doi: 10.1038/s41586-021-04349-7
7. Zheng, X., Dolde, J., Lochab, V., Merriman, B. N., Li, H., and Kolkowitz, S. 2022. Differential clock comparisons with a multiplexed optical lattice clock. *Nature*. 602:425–30. doi: 10.1038/s41586-021-04344-y
8. Monroe, C. R., and Wineland, D. J. 2008. Quantum computing with ions. *Sci. Am*. 299:64–71. Available online at: <https://www.scientificamerican.com/article/quantum-computing-with-ions/>

פורסם אונליין: 22 ביולי 2024

נערך על ידי: Joey Shapiro Key

מנחים מדעיים: Kalee Tock | Ilan Be'Ery

ציטוט: Segev N | Wineland D (2024) איך לוכדים אטום? סיפורים על מדידת הזמן ועל אפשרויות שימוש בעתיד. *Front. Young Minds*. doi: 10.3389/frym.2023.857992-he

תורגם והותאם מ: Segev N and Wineland D (2023) How to Catch an Atom: Tales on Time-Telling and Future Applications. *Front. Young Minds* 11:857992. doi: 10.3389/frym.2023.857992

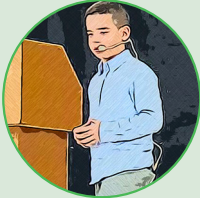
הצהרת ניגוד אינטרסים: הכותבת NS מצהירה שהייתה מועסקת של פרונטירז בזמן הגשת המאמר. לא הייתה לכך השפעה על תהליך ביקורת העמיתים ועל ההחלטה הסופית. המחברים מצהירים כל המחקר נערך בהעדר קשר מסחרי או פיננסי שיכול להתפרש כניגוד אינטרסים פוטנציאלי.

זכויות יוצרים © 2023 © Segev | Wineland 2024. זהו מאמר בגישה פתוחה שמופץ תחת תנאי רישיון [Creative Commons Attribution License \(CC BY\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/). 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

RYAN, גיל: 15

אני אוהב מאוד לכתוב קוד, לפתור קוביות הונגריות ולשחק במיינקראפט.



YARDEN, גיל: 13

נולדתי וגדלתי בישראל. התחביבים העיקריים שלי הם קרב מגן ישראלי ורטוריקה. יש לי חגורה חומה בקרב מגן ישראלי, וזכיתי במקום השני בתחרות 'הנואם הצעיר' של ישראל. אני גם בצופים, ואוהב לשיר.

הכותבים

NOA SEGEV

נועה שגב היא כותבת מדעית ומנהלת פרויקטים בפרונטירז – מדע לצעירים. נועה השלימה את לימודי התואר הראשון שלה בפיזיקה באוניברסיטה העברית בירושלים, ואת התואר השני שלה בהנדסת אנרגיה מתחדשת בטכניון – מכון טכנולוגי לישראל. מאז 2019, היא מראיינת זוכות וזוכי פרס נובל, וכותבת יחד איתם את המאמרים המתפרסמים באוסף הנובל של פרונטירז – מדע לצעירים. מטרתה של נועה היא להנגיש לכולם את המדע שעומד בבסיס התגליות שהובילו לזכיות בפרס נובל, ולסייע לכלות ולחתני פרס נובל לחלוק עם הכלל תובנות רבות-ערך, פרי ניסיונם המקצועי והאישי. [*noasegev@gmail.com](mailto:noasegev@gmail.com)

DAVID WINELAND

דיוויד וינלנד קיבל את התואר הראשון שלו מאוניברסיטת קליפורניה שבברקלי בשנת 1965, ואת התואר השלישי שלו מאוניברסיטת הרווארד ב-1970. הוא השלים את הפוסט-דוקטורט שלו באוניברסיטת וושינגטון בסיאטל, ולאחר מכן הצטרף לחטיבת הזמן והתדר של המכון הלאומי לתקנים ולטכנולוגיה בארה"ב (NIST) בבולדר, קולורדו, שם היה עמית NIST ועמד בראש קבוצת מחקר. כיום הוא מכהן במעמד יושב ראש מכובד למחקר ע"ש Philip H. Knight וכפרופסור למחקר במחלקה לפיזיקה של אוניברסיטת אורגון שביוג'ין, אורגון. מאז שהחל את לימודי התואר השני שלו, המטרה ארוכת הטווח של עבודתו הייתה להעלות את רמת הדיוק של הספקטרוסקופיה האטומית – היא מדידת התדרים של תנודות האופייניות לאטומים. המחקר הזה תרם לטיוב השעונים האטומיים, והוביל לעריכת ניסויים המאפשרים שליטה מדויקת ברמות האנרגיה האטומית ובתנועה האטומית. ניתן ליישם שליטה מסוג זה על מטרולוגיה המוגבלת ברמת הדיוק שלה על ידי אילוצי מכניקת הקוונטים, וכן על דוגמאות המתבססות על עקרונות היסוד של המחשב הקוונטי. על עבודה זו, הוא זכה בפרס נובל לפיזיקה לשנת 2012 יחד עם סָרְד' הָרוֹש, קולד' דה פראנס, פריז. דיוויד נשוי ל-Sedna Quimby Wineland, ויש להם שני בנים. [*djw34@uoregon.edu](mailto:djw34@uoregon.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



קרן משפחת
שעשוע
Shashua Family Foundation



שְׁחִבּוֹר רנ"א – איך מבצעים פעולות 'גזירה' ו'הדבקה' של גֵּנוֹם?

Phillip A. Sharp^{1,2*}

¹המחלקה לביולוגיה, המכון הטכנולוגי של מסצ'וסטס (MIT), קיימברידג', מסצ'וסטס, ארה"ב
²מכון קוך למחקר אינטגרטיבי של מחלת הסרטן, המכון הטכנולוגי של מסצ'וסטס (MIT), קיימברידג', מסצ'וסטס, ארה"ב

סוקרים צעירים

ANASTASIA
גיל: 14



KENZO
גיל: 10



MAXIME
גיל: 14



NOURA
גיל: 15



SAIF
גיל: 15



YOUNIS
גיל: 15



המדע בכלל, ומדעי החיים בפרט, מְזַמְּנִים לצעוד בנתיב מסקרן. ככל שאנו מעמיקים את ההבנה בנושא מסוים, כך אנו נהיים מודעים לדברים שלא הבחנו בהם בתחילת הדרך. לעיתים, ההסתכלות החדשה הזו אפילו גורמת לנו לשקול מחדש את התפיסות הבסיסיות ביותר שלמדנו לאורך הדרך, ולהגדיר מחדש. זה בדיוק מה שקרה לאחר שגילינו תהליך המכונה שְׁחִבּוֹר רנ"א (להלן גם: 'שְׁחִבּוֹר' / 'תהליך השחבור'). בתהליך זה חותכים ומדביקים יחד פיסות של הוראות גנטיות, ליצירת הוראות לייצור חלבונים. תגלית זו הניעה אותנו לבצע חשיבה מחודשת על כל מה שחשבנו בעבר לגבי גֵּנוֹם – יחידות המידע היסודיות ביותר בתחום הביולוגיה. במאמר זה, אספר לכם מה גילינו על אודות תהליך השחבור, כיצד התגלית הזו השפיעה על תפיסותינו לגבי גֵּנוֹם, וכיצד אנו משתמשים כיום בִּידֵעַ הזה כדי לשפר באופן מהותי את חייהם של אנשים.

פרופסור פִּילִיפ שְׁאָרְפּ זכה בפרס נובל לפיזיולוגיה או לרפואה לשנת 1993, במשותף עם פרופ' רִיצ'רְד רוֹבֶּרְטס, על גילוי שְׁחִבּוֹר הֵּנוֹם.

דנ"א (DNA)

מידע גנטי המאוחסן בכל התאים.

חלבונים (Proteins)

מכונות ביולוגיות זעירות שלוקחות חלק בתפקודים מכריעים רבים המתרחשים בגוף כגון תנועת שרירים, עיכול וחיסוי.

שֶׁעֵתוֹק (Transcription)

התהליך שבו דנ"א מועתק לרנ"א שליח.

גֵּן (Gene)

מקטע של דנ"א או כמה מקטעים המכילים את ההוראות לייצור חלבונים.

רנ"א שליח (Messenger RNA, mRNA)

רנ"א המשמש לייצור חלבונים.

תרגום (Translation)

התהליך של ייצור חלבון בהתבסס על הוראות המצויות ברנ"א שליח.

איור 1

דנ"א מכיל את המידע לייצור חלבונים.

תאים חיים משתמשים במידע הגנטי שבדנ"א כדי לייצר חלבונים בשני שלבים עיקריים; ראשית, המידע בדנ"א מועתק בתהליך השעתוק, במטרה ליצור עותק נייד של רנ"א שליח, המכיל הוראות ליצירת חלבון מסוים. אז, הרנ"א שליח עובר ל'מפעל' ייצור החלבונים בתא, שם מיוצר החלבון המסוים במסגרת תהליך התרגום.

מקרא:

Transcription = שעתוק

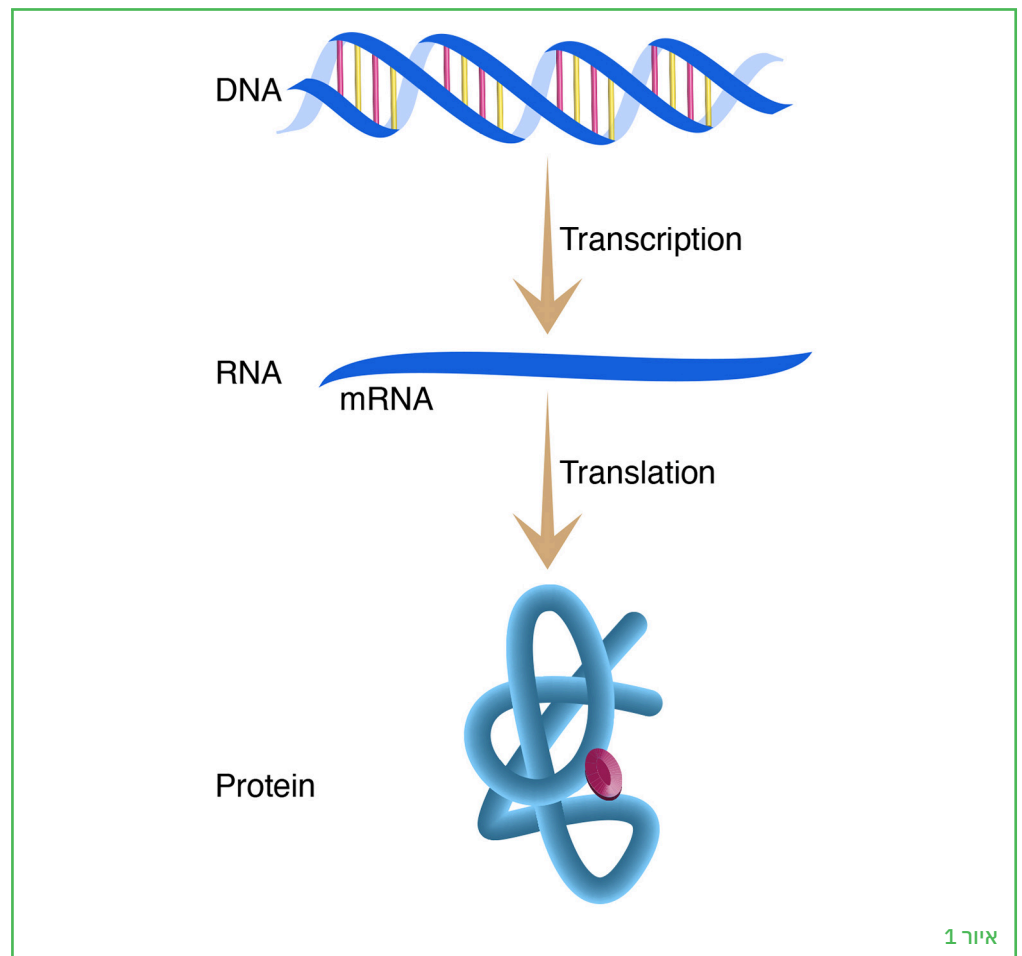
Translation = תרגום

Protein = חלבון

mRNA = רנ"א שליח.

מְנִיָּם לַחֲלבוֹנִים – כִּיצַד הַדְּנ"א מְנַהֵל אֶת תְּפִקוּדֵי הַתָּא?

קריאת המידע הגנטי – ה'הוראות' המאוחסנות בצורת דנ"א בתאים – והפיכת ההוראות הללו למבנים ולתפקודים של האורגניזם החי, הם אחד מתהליכי החיים היסודיים ביותר (איור 1). ההוראות המצויות בדנ"א מכילות קוד לייצור חלבונים – מכונות ביולוגיות זעירות שאחראיות על תפקודים מכריעים רבים בגוף. ייצור חלבונים מדנ"א מצריך צעד ביניים, המכונה שֶׁעֵתוֹק. בתהליך השעתוק, מְעַרְךְ הוראות המקודדות בְּרִצְפָּף של דנ"א (המכונה גֵּן), הופך לעותק נייד שיכול לנוע ל'מפעל' ייצור החלבונים בתא. עותק הדנ"א הזה, המניע יצירה של חלבונים, מכונה רנ"א שליח (mRNA). בשלב הבא, התרגום – ההוראות שברנ"א שליח משמשות לייצור חלבונים.



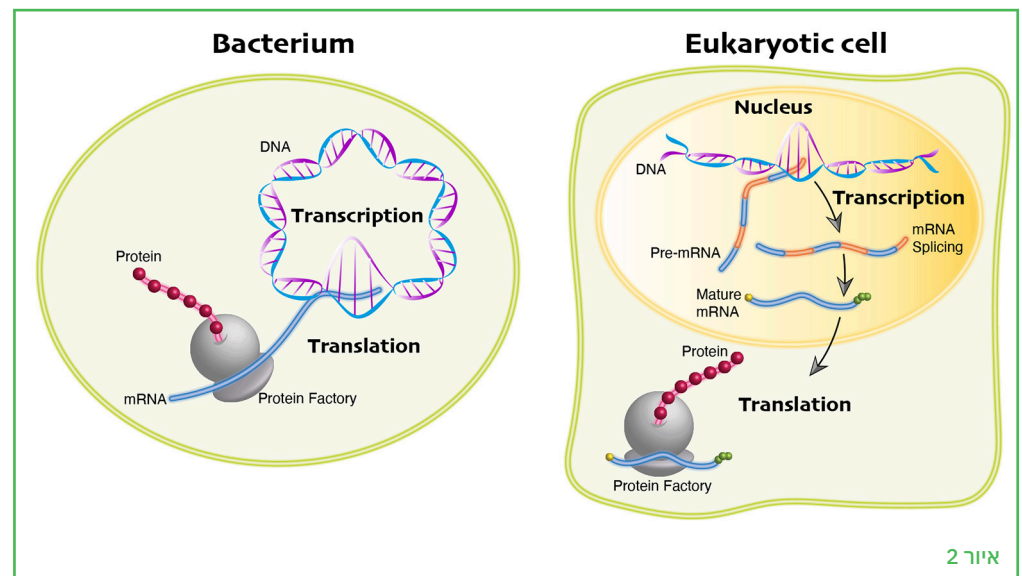
איור 1

לאורך האבולוציה, תהליך ייצור הרנ"א שליח מדנ"א הפך מורכב יותר. בחלוף הזמן, נוצר שלב ביניים חדש לחלוטין בין השעתוק לתרגום, המכונה 'שֶׁחִבּוּר רנ"א' (Splicing). בשלב זה פיסות נפרדות של רנ"א שליח נגזרות ומודבקות יחד, ליצירת הגרסה המוגמרת של הרנ"א שליח. בהמשך המאמר נסביר את תהליך השֶׁחִבּוּר; כיצד גילינו אותו; מְהֵם יתרונותיו, ואיך ניתן להשתמש בידע הזה כדי לטפל במחלות מסוימות.

שְׁחָבוֹר רִנ"א – הגרעין הוא לב העניין!

לזנים העתיקים ביותר שהתפתחו בכדור הארץ היה רק תא אחד, ללא גרעין תא [1], ולכן החומר הגנטי שלהם לא הופרד משאר תוכנו של התא על ידי קרום תא (מִמְבְּרָנָה). גרעין התא התפתח רק לאחר 1-1.5 מיליארד שנים של אבולוציה. אורגניזמים ללא גרעין תא מכונים פְּרוֹקָרְיוֹטִים, ואורגניזמים שבתאיהם יש גרעין מכונים אֶאֻקָרְיוֹטִים. חיידקים הם דוגמה לפרוקריוטים. בניגוד אליהם, כל היונקים, ובכלל זה בני האדם, הם אאוקריוטים.

תהליך ייצור החלבונים התגלה לראשונה בחיידקים. החוקרים גילו כי בתאי החיידקים נוצר עותק של רנ"א שליח מפיסה רציפה של דנ"א (גֵן), ואז הוא מתורגם לחלבון מסוים (איור 2, צד שמאל) [2]. באותו זמן, רוב החוקרים האמינו כי תהליך זה מתקיים בצורה דומה בתאים אאוקריוטים. אולם כעבור כמה שנים, גילינו כי בתאים אאוקריוטים מתווסף שלב נוסף לאחר השעתוק ולפני התרגום [3]. בשלב הזה, הרנ"א שליח שמוצר בתהליך השעתוק עובר שחבור (גזירה והדבקה), וכך נוצר הרנ"א שליח המוגמר המשתתף בתהליך התרגום. עותק הדנ"א ההתחלתי מכונה קֶדֶם-רנ"א שליח, והגרסה הסופית המתקבלת לאחר השחבור מכונה רנ"א שליח בוגר (איור 2, צד ימין).



איור 2

שְׁחָבוֹר – כך 'גוזרים' ו'מדביקים' רנ"א

תהליך שחבור הרנ"א, שבו קֶדֶם-רנ"א שליח הופך לרנ"א שליח בוגר, דומה מעט לעריכה של ספר. דְּמִינֵנוּ שיש לכם ספר המכיל מקטעי מילים שיוצרות יחד משמעות, ובהם שזורים מקטעי ג'יבריש (מילים ששילובן אינו יוצר כל משמעות). כדי שניתן יהיה לקרוא את הספר, עליכם לערוך אותו – להוציא את מקטעי הג'יבריש, ולחבר את המקטעים בעלי המשמעות. החלקים המחוברים יוצרים משפטים שהם בעלי מטרה או היגיון מבחינת הקורא. נחזור לרנ"א שליח – מסתבר שהקֶדֶם-רנ"א שליח מורכב מרֶצְפֵי דנ"א בעלי משמעות, שביניהם משולבים רֶצְפֵים של ג'יבריש. הרצפים בעלי המשמעות מכונים אֶקְסוֹנִים, והרצפים חסרי ההיגיון מכונים אֵינְטְרוֹנִים. כאשר מולקולה של קֶדֶם-רנ"א שליח עוברת שחבור, החלקים

פְּרוֹקָרְיוֹטִים (Prokaryote)

אורגניזם, כמו חיידק למשל, שתאיו אינם מכילים גרעין תא.

אֶאֻקָרְיוֹטִים (Eukaryote)

אורגניזם, כמו בני אדם ויונקים אחרים, שתאיו מכילים גרעין תא.

איור 2

ייצור חלבונים בתאים

פְּרוֹקָרְיוֹטִים וְאֶאֻקָרְיוֹטִים.

צד שמאל: בתאים

פרוקריוטים חסרי גרעין תא, כמו חיידקים (Bacterium), הרנ"א שליח מיוצר מדנ"א בתהליך השעתוק, ולאחר מכן מתורגם ישירות לחלבון מסוים. צד ימין: בתאים אאוקריוטים (Eukaryotic cell) בגרעין התא קֶדֶם-רנ"א שליח (Pre-mRNA) בתהליך השעתוק. אז, הקֶדֶם-רנ"א שליח עובר שלב עיבוד נוסף המכונה שְׁחָבוֹר רִנ"א. רק לאחר מכן הרנ"א שליח יוצא מהגרעין (Nucleus) ועובר ל'מפעל' לייצור החלבונים (Protein Factory), שבו מתרחש שלב התרגום (האיור הותאם מ-Khan Academy).

מקרא:

Mature mRNA = רנ"א

שליח בוגר

mRNA Splicing = שְׁחָבוֹר

רנ"א שליח.

אֶקְסוֹן (Exon)

מקטע 'בעל היגיון' בגֵן, המשמש לייצור חלבונים.

אֵינְטְרוֹן (Intron)

מקטע 'חסר היגיון' בגֵן. הוא מוסר בתהליך הייצור של רנ"א שליח בוגר מקֶדֶם-רנ"א שליח.

ההגייוניים מתחברים, והחלקים הבלתי-הגייוניים מוקרים ומושמידים. בסיום תהליך הגזר והדבקה הזה, נוצר רנ"א שליח בוגר המשמש לייצור חלבונים.

מדוע הדנ"א של האאוקריוטים מכיל אינטרונים של ג'יבריש' מלכתחילה? ובכן, גם המדענים מנסים לענות על שאלה זו, ועדיין אין עליה תשובה חד-משמעית. אנו יודעים כי מספר הגנים האנושיים עומד על כ-23,000, וכמעט כולם מורכבים מאקסונים רבים שעוברים תהליך של שחבור בהרכבים שונים בתאים שונים, או בזמנים שונים בחלק מהתאים. המשמעות היא שמגן אחד יכולים להיווצר חלבונים רבים (וכתוצאה מכך גם תפקודים רבים), כשבחרים שילובים שונים של אקסונים מאותו הגן. הדבר מכונה **שחבור חליפי (איור 3)**. ישנם מדענים המשערים כי השחבור החליפי הוא שאפשר אבולוציה של אורגניזמים מורכבים, כמו בני האדם. השחבור החליפי מאפשר שימוש יעיל בדנ"א – אורגניזמים המשתמשים בשחבור חליפי יכולים לייצר חלבונים מורכבים ולבצע תפקודים מורכבים תוך שימוש בפחות גנים.

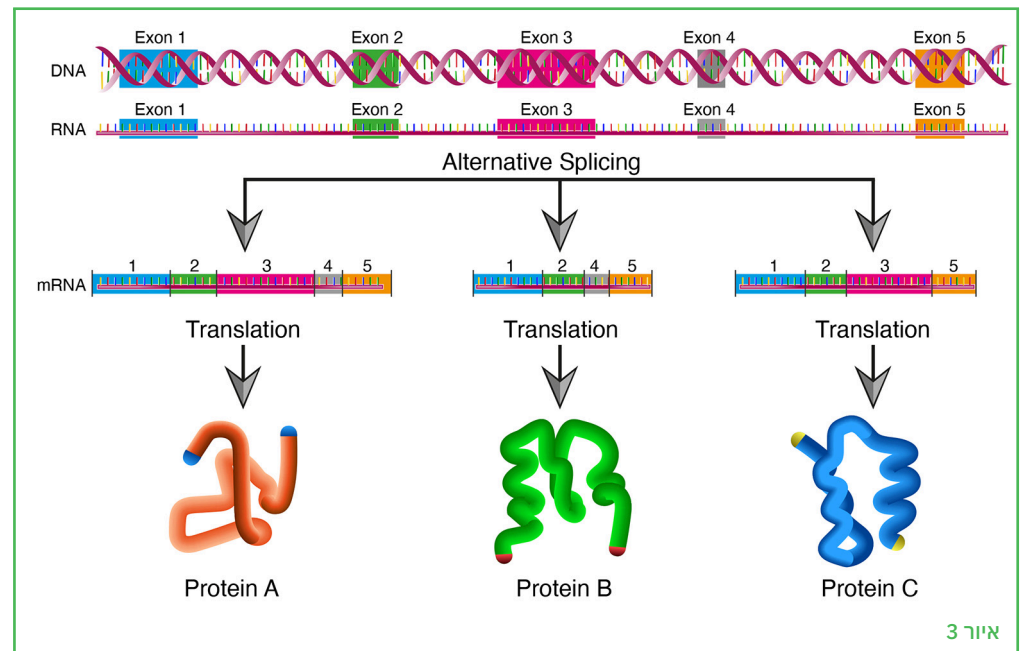
שחבור חליפי

(Alternative splicing)

שימוש בשילובים שונים של אקסונים ליצירת כמה חלבונים מאותו הגן.

איור 3

שחבור חליפי. בשחבור החליפי אקסונים של אותו הגן מתחברים יחד במגוון הרכבים. הם יוצרים סוגים שונים של רנ"א שליח, ולפיכך חלבונים שונים בעלי תפקודים מורכבים. ייתכן כי זהו היתרון האבולוציוני שאפשר את התפתחותם של אורגניזמים מורכבים, כמו בני האדם (התמונה הותאמה מוויקיפדיה).



איור 3

כיצד הנגיפים סייעו לנו לגלות את תהליך השחבור?

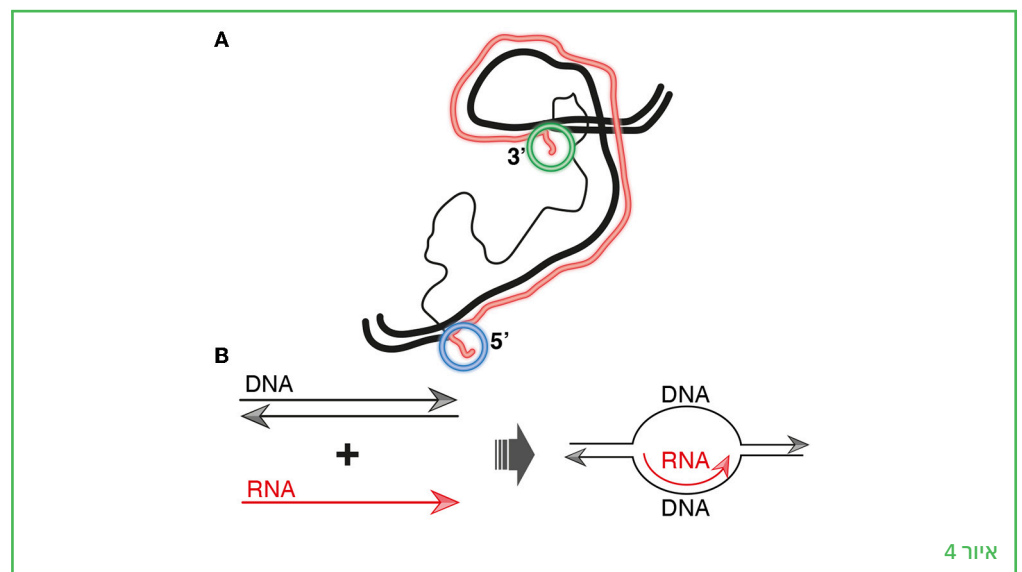
כדי לחקור את שחבור הרנ"א השליח במעבדה שלנו, השתמשנו בנגיף אָדנו מסוג 2 [3]. לנגיף זה יש דנ"א קצר יחסית, והוא משתמש בתאי חיות כדי לשכפל את הדנ"א שלו במהירות רבה. בְּשָׁל שני המאפיינים הללו, נוח להשתמש בנגיף זה במחקרים מדעיים, כיוון שהוא מהווה מערכת פשוטה המייצרת עותקים רבים של עצמה באופן טבעי.

לאחר שבחרנו בנגיף האדנו מסוג 2 כמערכת המחקר שלנו, רצינו להשוות בין מולקולות הדנ"א ומולקולות הרנ"א שליח שלו. אם רנ"א שליח תואם בצורה מושלמת פיסה מסוימת של דנ"א, סביר להניח כי הרנ"א שליח הזה הועתק ישירות מהדנ"א ללא שחבור, כפי שקורה אצל חיידקים. אם הרנ"א שליח לא תואם לפיסת הדנ"א המסוימת, כנראה שהתרחש שחבור שיצר רנ"א שליח בוגר.

עבור ההשוואה שלנו בין דנ"א לרנ"א שליח, בחרנו את הרנ"א שליח הנפוץ ביותר בנגיף האדנו מסוג 2, המקודד חלבון בשם הֶקְסוֹן. כשהשווינו בין הרנ"א שליח הזה לחלק הדנ"א הרלוונטי, מצאנו שני אזורים שבהם לא התקיימה התאמה בין הדנ"א לרנ"א שליח: אחד האזורים נקרא 'קצה 3' (מכונה 'קצה השלוש פְּרִיִּים') של גְּדִיל הרנ"א שליח (איור 4, מוקף עיגול ירוק). ידענו כי האזור הזה הוא מְעִין 'זנב' מיוחד המתווסף לרנ"א שליח כדי להגן עליו כשהוא נע ברחבי התא. האזור הנוסף שלא התקיימה בו התאמה היה בקצה האחר של גדיל הרנ"א שליח, שנקרא 'קצה 5' (מכונה 'קצה החמש פְּרִיִּים'; איור 4, מוקף עיגול כחול). במקרה הזה הופתענו, משום שקצה 5' של מולקולת הרנ"א שליח הכיל פיסה ארוכה של רנ"א שליח שלא תָּאָם את חֶלְקֵי הדנ"א המסוּיָם, ולא ידענו מאין היא הגיעה.

איור 4

ההשוואה בין דנ"א של נגיף האדנו לרנ"א שליח של נגיף זה, סייעה לנו לגלות את שחבור הרנ"א. (A) במסגרת המחקר שלנו, השתמשנו בנגיף האדנו כדי לחפש שחבור רנ"א שליח בתאים אאוקריוטים. לשם כך, השווינו את הרנ"א שליח (מסומן בקו אדום עבה) המקודד את החלבון הֶקְסוֹן, למקטע הדנ"א הרלוונטי (מסומן בקו שחור עבה); הקו השחור הדק מייצג את גְּדִיל הדנ"א האחר שנפרד מהגדיל הראשון). גילינו שני אזורים לא תואמים: קצה 3' וקצה 5' של הרנ"א שליח (מוקפים עיגולים בצבעי ירוק וכחול). הופתענו לגלות כי המקטע הארוך בקצה 5' של הרנ"א שליח לא נקשר לדנ"א. ממצא זה הצביע על כך שהתקיים תהליך נוסף בעת יצירת בעת יצירת הרנ"א שליח. (B) שרטוט כללי המראה כיצד גדיל רנ"א נקשר לגדיל דנ"א, כאשר אנו מפרדים בין שני גדילי דנ"א במסגרת הניסויים (האיור הותאם מ-Berk [4]).



איור 4

כדי לפתור את החידה, היה עלינו לגלות מאיפה הגיע האזור הבלתי תואם בקצה 5' של הרנ"א שליח. לאחר דיונים רבים, הצענו את הֶבְּרָה שלפיה ייתכן שהפיסה הבלתי תואמת הגיעה ממקום אחר בדנ"א. משמעות הדבר היא שישנה פיסת דנ"א רציפה אחת המקודדת את רוב הרנ"א שליח של חלבון הֶקְסוֹן, וכי במקום אחר כלשהו בדנ"א ישנה פיסת דנ"א נוספת שמקודדת את קצה 5'. כדי לבדוק את הרעיון הזה, השווינו בין הרנ"א שליח של ההקסון למקטע אחר של דנ"א, הממוקם ליד המקטע שְׁתָּאָם את רוב הרנ"א שליח של ההקסון בניסוי הראשון שלנו. גילינו דבר מדהים לגמרי: קצה 5' ברנ"א שליח של ההקסון היה מחובר לדנ"א בארבעה מקטעים נפרדים, ובין המקטעים הללו היו שלוש לולאות של דנ"א (איור 5). ממצא זה לימד אותנו על כך שקצה 5' שוחבר מארבעה אֶקְסוֹנִים שונים, שהופרדו על ידי שלושה אינטרונים.

זו הייתה תגלית חדשנית לגמרי, כיוון שאף אחד אחר מעולם לא העלה את ההשערה שאפשר 'לגזור' ו'להדביק' רנ"א שליח ממקטעי דנ"א שונים. תגלית שחבור הרנ"א שינתה את התפיסה שלנו לגבי נְגִיִּים!

איור 5

שחבור רנ"א שליח של הקסון.

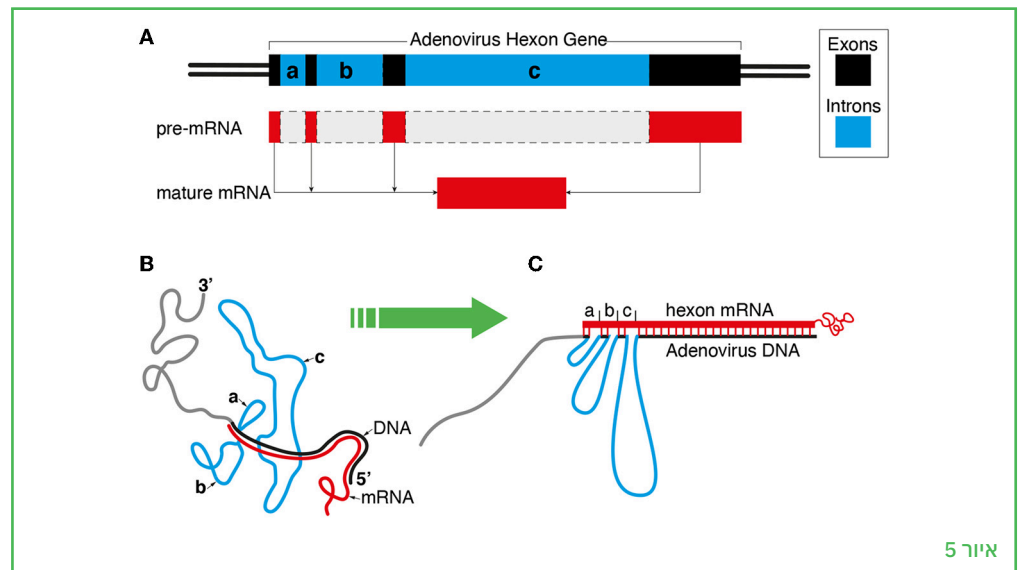
(A) חלק מנגן הקסון (דנ"א), המכיל ארבעה אקסונים ושלושה אינטרונים. קצה 5' ברנ"א שליח של חלבון הקסון שוחבר ממקטע זה.

הקדם-רנ"א שליח הועתק ישירות מהדנ"א. בתהליך השחבור האינטרוני הוצאו, וכך התקבל רנ"א שליח בוגר. (B) בניסוי שלנו, כמה חלקים מהדנ"א של נגיף האדנו היו מחוברים לקצה 5' של הרנ"א שליח של חלבון הקסון (מסומן באדום), בעוד חלקים אחרים של הדנ"א לא היו מחוברים, ויצרו שלוש לולאות

אשר להן קראנו a, b, c החלקים המחוברים הם אקסונים, והלולאות הן אינטרונים. (C) הרנ"א שליח המשוחבר השלם של חלבון הקסון (hexon mRNA) קשור לדנ"א של נגיף האדנו -

Adenovirus DNA [קרדיט לאיורים: (A,B) הותאם מ-Berget ואחרים [3]; (C) פיליפ א. שארפ].

גן ההקסון של נגיף האדנו = Adenovirus Hexon Gene.



איור 5

חשיבה מחודשת לגבי מְהֵם הַגְּנִים

לפני שהכרנו את שחבור הרנ"א, חשבנו על גן כעל מקטע רציף של דנ"א המקודד חלבון מסוים. אולם כשגילינו את השחבור, הבנו כי גנים רבים הם משוחברים, כלומר מורכבים משילוב של מקטעי דנ"א שונים ובלתי רציפים (אקסונים). יתרה מזו אנו יודעים שניתן לקחת פיסות ומקטעים 'מְפֵה וּמְשֵׁם', ולהרכיב לא רק חלבון אחד אלא מגוון חלבונים. ישנן אפילו דוגמאות לקבוצה מסוימת של אקסונים המקודדת עשרות אלפי חלבונים שונים [5]!

אם כן, אם גן הוא לא רצף דנ"א מתמשך אחד המקודד חלבון אחד – מהו בדיוק? התשובה המלאה עדיין אינה בידינו. כפי שקורה לעיתים קרובות במדע, המורכבות שעומדת בפנינו היא אדירה, ואולי אף פעם לא נדע את כל התשובות. אף על פי כן, אנו תמיד מנסים להרחיב את ידיעותינו, ולנצל את המידע שברשותנו עד תום. בחלק הבא של המאמר נתאר כיצד אנו משתמשים בידע המצוי בידינו על אודות שחבור רנ"א כדי לשפר את חייהם של אנשים חולים, לרבות ילדים בגילים שלכם.

שחבור רנ"א לטובת האנושות

שחבור רנ"א הוא תהליך יסודי המתרחש בכל היצורים החיים, ובכלל זה בבני אדם. השחבור מאפשר לאורגניזם 'להפעיל' גנים מסוימים או 'לכבות' אותם, וכך עוזר לאורגניזמים לבצע רבים מהתהליכים המורכבים הנדרשים לקיום החיים. כמו בכל תהליך ביולוגי חשוב, כשמשו משתבש עלולה להתפתח מחלה. כדי לטפל במחלות הללו, עלינו להבין כיצד המנגנון הביולוגי הפגוע מתפקד, ואז לחשוב על דרכים לתקנו.

ישנם פיתוחים רפואיים מלהיבים מאוד המבוססים על שחבור רנ"א. רק לפני שנים ספורות הצלחנו בפעם הראשונה בהיסטוריה לטפל בהצלחה בילדים שחלו במחלה גנטית בשם 'ניוון שרירים שְׁדֶרְתִּי'. זוהי מחלה שנגרמת על ידי מוטציה בדנ"א, המנטרלת שחבור בגן מסוים כך שאקסון חשוב לא נכלל ברנ"א שליח הבוגר. מוטציה זו גורמת לחולים לאבד בהדרגה

תאים בחוט השדרה שלהם, השולטים על השרירים. כשמצב תאי חוט השדרה והשרירים מדרדר, אובדן התפקוד ההולך ומתרחב בתפקוד השרירים גורם לנכויות חמורות ופוגע באיכות החיים. לפני שגילינו את שחבור הרנ"א, ניוון שרירים שדרתי היה מחלה הגורמת למוות. כיום, בעזרת הידע שלנו בתחום שחבור הרנ"א, באפשרותנו להשפיע על תהליך השחבור כך שהאקסון החסר ייכלל ברנ"א שליח הבוגר. כך יכול להיווצר חלבון המתפקד כראוי, ואנשים הסובלים מניוון שרירים שדרתי יכולים להתפתח בצורה תקינה יותר ולנהל חיים רגילים למדי.

זו רק אחת הדוגמאות לעוצמתו של הידע שלנו על אודות שחבור רנ"א, שבכוחו לשפר את חייהם של בני האדם. הקמתי שתי חברות המתבססות על הידע לגבי שחבור רנ"א במטרה לפתח שימושים רפואיים חשובים. החברות נקראות **ביוג'ן ואנליזאם תעשיות פרמצבטיות**, ותוכלו ללמוד עליהן עוד דרך הקישורים.

עבורי, היה מלהיב מאוד לגלות את שחבור הרנ"א; לחקור את כל התהליך; לחשוב על משמעותו ועל הדרכים האפשריות להשתמש בו, ואז, כעבור 30-40 שנים, לזכות לראות כיצד המדע מתורגם לטיפול המשפר את חייהם של ילדים צעירים. זהו דבר נפוץ במדע, ובד בבד אחד הדברים המספקים ביותר בעיסוק במדע בכלל ובמדע ביו-רפואי בפרט – המדענים זוכים לגלות את הסודות הכמוסים ביותר הטמונים במערכות הביולוגיות, ויתרה מזו, לפעמים התובנות הללו יכולות לצייד אותנו בכלים לסייע לאחרים. עזרה לזולת היא אחד התחומים בחיים המסבים לאדם שביעות רצון רבה, במיוחד כשאפשר לסייע לאנשים להבין טוב יותר את העולם, את עצמם ואת מערכות היחסים שלהם עם אחרים. ההבנה הזו היא מה שגורם לבני האדם להיות ייחודיים ומעניינים.

המלצות למוחות צעירים

ברצוני לחלוק איתכם את מה שלמדתי כשבגרתי, כשהלכתי לבית הספר וכשניסיתי להבין במה אני רוצה לעסוק בחיים. גיליתי שכאשר עסקתי בדברים שעניינו אותי ושהלהיבו אותי, הייתה לי מוטיבציה ללמוד כמה שיותר על אודות אותם נושאים, מה שאפשר לי לתרום לחברה באופן משמעותי. אם תנסו להיות מעשיים מדי בחיים, ולא תקדישו זמן ומחשבה לתכנון העתיד שתרצו עבורכם, אולי לא תראו מספיק ממנו כדי להצליח לממש את חלומותיכם. אולם אם תשקעו יתר על המידה בחלומות בְּהִקְיָא, ייתכן שלעולם לא תביאו עצמכם לפתרון הבעיות שעימן תתמודדו כשתנסו להגשים את שאיפותיכם. תנו לסקרנותכם להוביל אתכם, ואם היא תיקח למחוזות שמלהיבים אתכם, הקדישו עצמכם לכך. אינכם יודעים איך העולם ייראה עוד שניים-שלושה עשורים – עשו את הדברים שמניעים אתכם ללמוד, וקחו את הזמן ליהנות תוך כדי.

חשוב גם לזכור שהחיים אינם נתיב סלול – לעיתים הם לא מתקדמים בצעדים צפויים מראש, אלא בהסתעפויות אפשריות רבות. יהיו זמנים בחייכם שבהם תצטרכו לקבל החלטות. החלטה מסוימת תוביל אתכם בנתיב מסוים, ואילו החלטה אחרת – בנתיב אחר. הנתביים הללו עשויים להיות שונים זה מזה, בפרט כשמדובר בקבלת החלטות בעלות השלכות ארוכות טווח, אבל זה בסדר. בהגיעכם לאחד הצמתים הללו, בְּחַרוּ באחד הנתביים, ובעוד אתם הולכים בעקבות התשוקה שלכם, זְכְרוּ ליהנות מהדרך!

תודות

ברצוני להודות לנעוה שגב על עריכת הריאיון שהיווה את הבסיס למאמר זה, ועל כתיבה משותפת של המאמר, ולזהבה כהן על האיורים.

חומרים נוספים

RNA Splicing: What is a Gene?—Phillip A. Sharp.

Nobel Lecture: Split Genes and RNA Splicing—Phillip A. Sharp.

מקורות

1. Cooper, G. M. 2000. "The cell: a molecular approach," in *The Origin and Evolution of Cells, 2nd Edn* (Sunderland, MA: Sinauer Associates). Available online at: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/{NBK9841}/>
2. Jacob, F., and Monod, J. 1961. On the regulation of gene activity. *Cold Spring Harb. Symp. Quant. Biol.* 26:193–211. doi: 10.1101/SQB.1961.026.01.024
3. Berget, S. M., Moore, C., and Sharp, P. A. 1977. Spliced segments at the 5' terminus of adenovirus 2 late mRNA. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 74:3171–5. doi: 10.1073/pnas.74.8.3171
4. Berk, A. J. 2016. Discovery of RNA splicing and genes in pieces. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 113:801–5. doi: 10.1073/pnas.1525084113
5. Schmucker, D., Clemens, J. C., Shu, H., Worby, C. A., Xiao, J., Muda, M., et al. 2000. *Drosophila* Dscam is an axon guidance receptor exhibiting extraordinary molecular diversity. *Cell* 101:671–84. doi: 10.1016/S0092-8674(00)80878-8

פורסם אונליין: 22 ביולי 2024

נערך על ידי: Robert Knight

מנחים מדעיים: Asma Bashir | Alexandra Dimitri

ציטוט: Sharp PA (2024) שֶׁחֲבוּר רנ"א – איך מְבַצְעִים פעולות 'גְזִירָה' ו'הַדְבָקָה' של גְנוֹמִים? Front. Young Minds. doi: 10.3389/frym.2023.1063940-he

תורגם והותאם מ: Sharp PA (2023) RNA Splicing—Cutting And Pasting Genes. Front. Young Minds 11:1063940. doi: 10.3389/frym.2023.1063940

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

זכויות יוצרים © 2023 © Sharp 2024. זהו מאמר בגישה פתוחה שמופץ תחת תנאי רישיון [Creative Commons Attribution License \(CC BY\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/). 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

ANASTASIA, גיל: 14

אני Anastasia, תלמידת כיתה י'. מדע הוא דבר מרתק בעיניי! יש בי תשוקה ללמוד ולגלות הזדמנויות חדשות. החלום שלי הוא ללמוד רפואה, כיוון שאני מתעניינת מאוד בדרך הפעולה של גוף האדם, וכיצד הוא עשוי להיות מושפע מגורמים שונים. פרט ללימודים אני אוהבת לצייר ולעסוק בעיצוב וביצירה, וקבֵרה במועדונים רבים של פעילויות העֶשָׂרה. יותר מכול, אני נהנית להכין קינוחים (יש לי חולשה לדברים מתוקים)!

KENZO, גיל: 10

היי, שמי Kenzo, בן 10. אני אדם נלהב וחברתי מאוד. יש לי הרבה חברים וקל לי לרכוש חברים חדשים. נהנה להאזין לשירים, לשחק במשחקי וידיאו, לקרוא ספרי קומיקס, ואוהב מאוד אומנויות לחימה והגנה עצמית. התחביב האהוב עליי הוא פֶרְקוּר (ענף ספורט אתגרי המשלב מכשולים במרחב העירוני). בבית הספר נהנה מספורט, אומנות, מתמטיקה, ומההפסקות. לעיתים קרובות אני מבטא את מחשבותיי ומדבֵר בשעה שהמורים מסבירים, כדי שהזמן יעבור מהר יותר.

MAXIME, גיל: 10

שמי הוא Maxime. אוהב ספורט, מוזיקה ומדעים, במיוחד את תחום החלל. אני חקרן וסקרן מאוד, נהנה ממצבים המצריכים פתרון בעיות. לאחרונה התחלתי לעסוק בתכנות, ואני אוהב זאת.

NOURA, גיל: 15

אני Noura. מגלה עניין במגוון דברים כמו לִבְנוֹת רובוטים ולנגן בפסנתר, אך למדע יש מקום מיוחד בליבי. לכן אני תמיד מתעניינת במחקרים מדעיים עדכניים ובפרויקטים מדעיים.

SAIF, גיל: 15

היי! שמי הוא Saif, בן 15. מאז ומתמיד התלהבתי ממדע, במיוחד מבילוגיה ומכימיה. נהנה לקרוא ספרי מדע וביוגרפיות של אנשים מרתקים, כמו סטיב ג'ובס (יָזָם אמריקאי, ממייסדי תאגיד המחשוב והתקשורת 'אָפֶל', והמנכ"ל הראשון שלו). אני גם משתתף בתוכניות ובתחרויות שמגבירות ומחזקות את תשוקתי למדע, כמו התחרות שבה זכיתי בפרויקט הקבוצתי הטוב ביותר ביריד המדע הלאומי לשנת 2020. כמו כן, נהנה לערוך ניסויים בהנחיית המורה שלי למדעים.

YOUNIS, גיל: 15

היי! שמי הוא Younis, ואני בן 15. תמיד נמשכתי לתחומי מדע שונים כי אני מוצא אותם מרתקים, במיוחד ניהול סביבתי; גיאוגרפיה; גיאולוגיה וחלל. דרך פרונטירז – מדע לצעירים, אני מקווה ללמוד עוד על אודות העולם שבו אנו חיים.



הכותבים

PHILLIP A. SHARP



פרופסור פיליפ אָלן שָׂאָרְפּ הוא פרופסור אמריקאי לביולוגיה מולקולרית, חבר במחלקה לביולוגיה ובמכון קוֹך למחקר אינטגרטיבי של מחלת הסרטן, במכון הטכנולוגי של מסצ'וסטס (MIT), מסצ'וסטס, ארה"ב. למד כימיה ומתמטיקה ביוניון קולג' (מוסד אקדמי בארה"ב), והשלים את לימודי הדוקטורט בכימיה באוניברסיטת אילינוי באוֹרְבֶּנְה-שמפיין, ב-1969. בסיום לימודי הדוקטורט השלים את הכשרת הפוסט-דוקטורט שלו במכון הטכנולוגי של קליפורניה (קאלטק), ולאחר מכן חָקַר ביטוי גֵנִים בתאים אנושיים במעבדת קולד ספרינג הרבור שבניו יורק, ארה"ב. ב-1974, פרופסור שארפ הצטרף למרכז לחקר הסרטן ב-MIT (כיום מכון קוֹך למחקר אינטגרטיבי של מחלת הסרטן), ועָרַף ניסויים שהובילו לגילוי תהליך שחבור הרנ"א. במהלך שנותיו ב-MIT כיהן כמנהל המרכז לחקר הסרטן (1985-1991) וכראש המחלקה לביולוגיה (1991-1999), וכן ייסד את מכון מקגוֹבֶרְן לחקר המוח, ועמד בראשו (2000-2004). פרופסור שארפ זכה בפרסים רבים בהם פרס האקדמיה הלאומית למדעים של ארה"ב (NAS) לביולוגיה מולקולרית (1980); פרס לואיזה גרוס הורוביץ (1988), מטעם אוניברסיטת קולומביה ארה"ב המעניקה את הפרס מדי שנה לחוקר או חוקרים עבור תרומה משמעותית לידע בתחומי הביולוגיה או הביוכימיה); פרס דיקסון (1991), ניתן לפרופ' שארפ בתחום הרפואה, מטעם אוניברסיטת פיטסבורג המעניקה את הפרס מדי שנה לאזרחי ארה"ב שתרמו באופן משמעותי ומקדם לרפואה); פרס נובל לפיזיולוגיה או לרפואה (1993), וכן עוטר במדליה הלאומית למדעים (2004). פרופסור שארפ ייסד שתי חברות ביו-רפואיות מצליחות המשתמשות בידע בתחום שחבור רנ"א ליישומים רפואיים. * kids@frontiersin.org

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



קרן ששפחת
שעשוע
Shashua Family Foundation



מערכת חוש הריח: החיים מריחים טוב

Richard Axel*

הפקולטה לרופאים ולמנתחים, המכון הרפואי על שם הווארד יוז, אוניברסיטת קולומביה, ניו יורק, ארצות הברית

סוקרים צעירים

PELEG

גיל: 10



העולם שסביבנו מלא בריחות. חלקם נעימים, מרגיעים ומעלים זיכרונות מתוקים מהעבר; אחרים יכולים להיות מְגָרִים או מפחידים. כמה ריחות לדעתכם אתם מסוגלים לזהות? אולי תופתעו לדעת שבני אדם יכולים לזהות מאות אלפי ריחות שונים, ואין זה דבר של מה בכך! אז איך אנחנו עושים זאת? במאמר זה נרחיח את דרכנו לאורך מערכת חוש הריח, נבחן את הקשרים הקיימים בין האף לבין המוח, נבין כיצד המוח מעבד ריחות שונים, ואילו תגובות ייחודיות הריחות מעוררים בו.

פרופסור ריצ'רד אַקְסֶל (Richard Axel) זכה בפרס נובל בשל פיזיולוגיה או רפואה בשנת 2004 עם פרופסור לינדה באק (Linda B. Buck) על גילוי קולטני הריח והמבנים הארגוניים של מערכת חוש הריח.

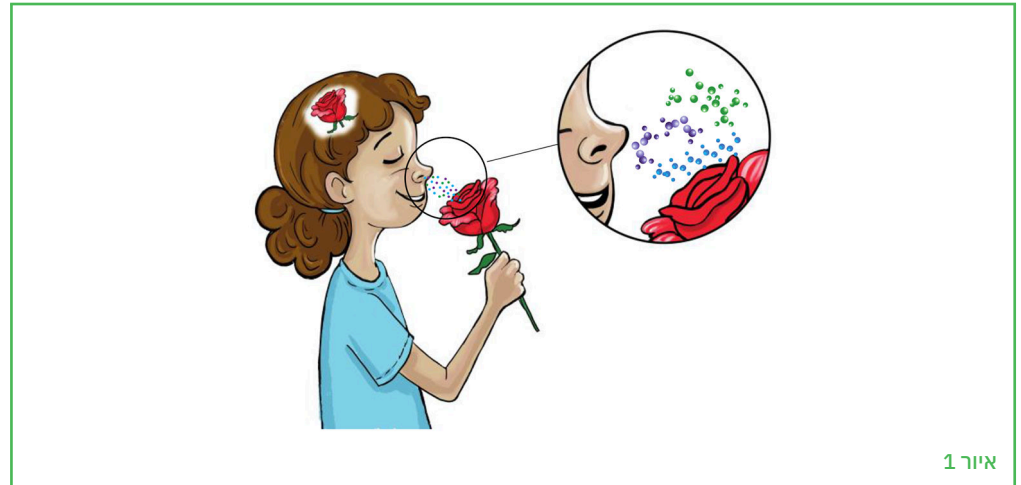
כיצד אנחנו מריחים?

כשאנחנו רואים זר פרחים יפהפה או עוברים ליד חנות בֶּשֶׁמִים, לעיתים קרובות עולה בנו דחף להתקרב ולהריח. האם אי פעם תהיתם מהו בדיוק הדבר הזה שאתם מריחים, וכיצד

אתם מזהים ריח מסוים? כשאנחנו מריחים פרח אנחנו שואפים מולקולות שמשתחררות ממנו. ואז נבנה במוחנו ייצוג פנימי של ניחוח הפרח באמצעות פעילות חשמלית המתרחשת במוח (איור 1).

איור 1

ייצוג אומנותי של תהליך ההרחה. מגוון מולקולות כימיות (מולקולות ריח) משתחררות מהוורד אל האוויר. המולקולות הללו מגיעות לאף, והן מפעילות אותות חשמליים המועברים למוח. האותות האלה מאתחלים פעילות חשמלית במספר אזורים במוח. הפעילות באזורים הללו מאפשרת לנו לזהות ריח מסוים – במקרה שלנו נזהה את ריחו של הוורד.



איור 1

מערכת חוש הריח (Olfactory System)

המערכת החושית האחראית על ההרחה.

אודורנט (Odorant)

מולקולות הריח שעצמים משחררים. הן נישאות באוויר ונכנסות לאפים שלכם.

אֶפִּיְתֵל האף (Nose Epithelium)

רקמה שנמצאת בחלק העליון האחורי של האף המשתפת בתהליך ההרחה.

קולטן (Receptor)

מולקולה שנמצאת על תא ומקיימת אינטראקציה ספציפית עם מולקולה נוספת. יחד הן מתפקדות כמו מנעול ומפתח. הקולטן מתרגם את האינטראקציה שלו לאות חשמלי בתוך התא.

תְּאֵי עֶצֶב חִישֵׁתִיִּים לניחוח (OSN תאי) (Olfactory Sensory Neurons)

תאי עצב להם יש קולטני חישה. התאים הללו מתרגמים את האינטראקציה עם האודורנטים לאותות חשמליים שניעים למוח.

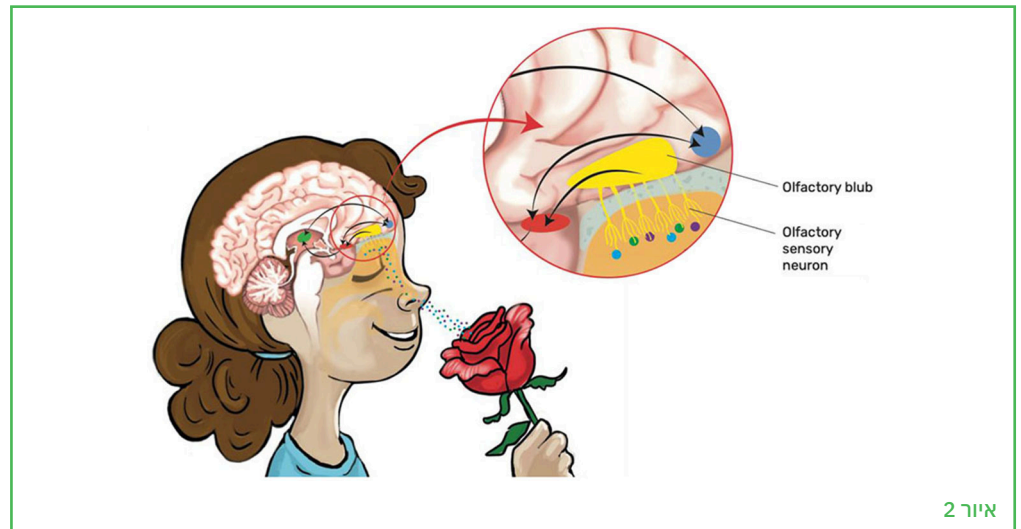
לפני שאנחנו צוללים לפרטי תהליך ההרחה, נכיר את דרך הפעולה של מערכת חוש הריח. הריחות מורכבים ממולקולות שמשתחררות מהדבר שאותו אנחנו מריחים (למשל תפוז או ורד). מולקולות הריח נקראות **אודורנטים** והן נישאות באוויר ונכנסות לאף. ברקמה הנמצאת בחלק האחורי העליון באף יש חלק שנקרא **אֶפִּיְתֵל האף**, שבו יש תאים שעליהם נמצאים **קולטנים** מיוחדים. לכל אחד מהקולטנים האלה יש צורה ייחודית, כך שהוא נוטה "לאהוב" אודורנטים מסוימים יותר מאודורנטים אחרים והוא פעיל יותר בנוכחותם (איור 2). הקולטנים הללו הם תְּאֵי עֶצֶב (נוֹרִינִים), הנקראים **תְּאֵי עֶצֶב חִישֵׁתִיִּים לניחוח (תאי OSN)**, או בקיצור קולטני ריח. כאשר מולקולות הריח מגיעות אל קולטני הריח, הקולטנים מתרגמים את האינטראקציה הזאת לאותות חשמליים הנעים מהם אל המוח. שימו לב למנגנון הגאוני! כשאתם מריחים משהו, כל מולקולת ריח (למשל בָּטָא-אֵיוֹנוֹן בוורד, לימוֹן בלימון, וּבְנֵזִיל אֶצְטָט בתות) מפעילה **צירוף ייחודי** של קולטני ריח [1] מתוך יותר מאלף סוגי קולטנים שיש באף. הצירוף הזה גורם להיווצרות דפוסים ייחודיים של פעילות חשמלית, המתבטאת כייצוג של ריח מסוים. אפשר לסכם זאת כך: קידוד הריחות במוח מבוסס על הפעלה של תת-קבוצה ייחודית של קולטני ריח. בכל אחד מהקולטנים הללו מתבצעת הפעלה חשמלית כאשר הקולטן נמצא באינטראקציה עם מולקולות ריח מסוימות, אבל לא עם מולקולות ריח אחרות. הפעילות החשמלית הזאת נעה מהקולטנים שבאף אל אזורים שונים במוח, שמעבדים ומציגים מידע שקשור בריח (איור 2).

כיצד מזהים את הגנים של קולטני הריח?

כשהתחלתי לחקור את מערכת חוש הריח, ידענו שחיות יכולות להבחין בין כמות עצומה של ריחות שונים, אך לא הבנו כיצד הן עושות זאת. עם זאת, הסקנו מכך שחייב להיות מנגנון מוחי שמאפשר לחיה לזהות כל כך הרבה מולקולות ריח. מסקנה זו הובילה אותנו לחשוב שוודאי יש הרבה מאוד גנים המקודדים לקולטני ריח (כלומר, מספיקים הוראות ליצירתם). כמו כן, תאי ה-OSN המתרגמים את קולטני הריח, צריכים להיות מסוגלים להפוך את האינטראקציה בין מולקולות הריח לבין הקולטנים לאותות חשמליים.

איור 2

קולטני ריח באף. במעמקי האף נמצא אֶפִּיתֵל האף. זהו החלק העליון והאחורי באף ובו נמצאים תְּאֵי עֶצֶב חישתיים לניחוח (תאי OSN) שעליהם יש מולקולות חלבון בשם "קולטני ריח". הקולטנים בתאי ה-OSN באים במגע עם המולקולות המרחפות באוויר, והאינטראקציה בין מולקולות הריח לבין תאי ה-OSN מייצרת אות חשמלי שנגע לאורך סיבי עצבים (הנקראים אַקסוֹנים) לאזור במוח בשם "פקעת ההרחה". משם הפעילות החשמלית מתפשטת לאזורים נוספים במוח (המסומנים בעיגולים בצבעים שונים) והם מעבדים מידע הקשור לריח.
= Olfactory bulb
פקעת ההרחה
Olfactory sensory neuron
= תְּאֵי עֶצֶב חישתיים לניחוח (OSN).



איור 2

במחקר שלנו רצינו למצוא את הגנים המקודדים לקולטני הריח. לשם כך התבססנו על שלוש הנחות שפישטו את המחקר שלנו: (1) קיימת משפחה גדולה של גנים המקודדים לקולטני ריח; (2) לקולטני ריח יש מנגנון להפיכת אינטראקציות עם מולקולות ריח לאותות חשמליים; (3) גנים המקודדים לקולטני ריח מתבטאים רק בתאי ה-OSN באפיתל האף. הנחות אלו סייעו לנו לחפש בעילות משפחה של גנים המקודדים לקולטני ריח בעכברים. בודדנו את תאי ה-OSN שלהם ומצאנו משפחת גנים חדשה של עכברים, המורכבת מכ-1,000 גנים שונים של קולטנים [2]. התרגשנו מכך מאוד, כיוון שזאת הייתה הפעם הראשונה שזוהו גנים של קולטני ריח. כעבור 23 שנים בערך, בשנת 2004, הגילוי הזה זיכה אותי ואת עמיתתי פרופ' לינדה באק בפרס נובל בפיזיולוגיה או רפואה [3].

לאחר שזיהינו את הגנים של קולטני הריח, היה באפשרותנו להשתמש בטכניקות מתוחכמות (כולל גנטיקה מולקולרית והדמיה עצבית) כדי לשאול שאלות מורכבות יותר על צורת הארגון ועל הפעילות של תאי ה-OSN באף ובמוח. לדוגמה, כמה גנים של קולטנים מבטא כל תא OSN? האם כל תא OSN מכיל רק סוג אחד של קולטני ריח או מספר סוגים של קולטנים? שתי האפשרויות הללו מרמזות על שני מבנים ומנגנוני תפקוד של מערכת הריח שהם שונים לחלוטין אחד מהשני. כפי שהתברר, האפשרות הראשונה היא הנכונה: כל תא OSN מבטא רק גן אחד מתוך כ-1,000 גנים אפשריים של קולטנים.

כיצד תְּאֵי עֶצֶב של מערכת חוש הריח (OSN) מאורגנים?

כעת נבחן כיצד תאי ה-OSN מאורגנים באיברים שבהם מתרחש תהליך זיהוי הריחות – באף ובמוח. לעכברים יש 10 מיליון תאי OSN באף ו-1,000 קולטני ריח שונים. כיוון שכל תא OSN מבטא רק סוג קולטן אחד, זה אומר שכל סוג קולטן מתבטא ב-10,000 תְּאֵי עֶצֶב (10 מיליון/10,000 = 1,000). איך 10,000 תאי העצב המבטאים את אותו קולטן הריח מאורגנים באפיתל האף? האם הם מתפרסים על פני שטח גדול, או שהם מקובצים בצפיפות? מה קורה לאותות החשמליים שהם מייצרים כשהם מקיימים אינטראקציה עם האודורנטים (מולקולות הריח) ה"אהובים" עליהם? האם מידע הקשור לאודורנט ספציפי מתכנס לאזור מסוים במוח?

תְּאֵי עֶצֶב (Neurons)

בלועזית: נוֹיְרוֹנים. סוג התא העיקרי במוח. תאי העצב מייצרים אותות חשמליים ומשדרים אותם לתאי עצב אחרים.

אֶקְסוֹנִים (Axons)

הסיבים העצביים הנושאים אותות חשמליים מתא עצב אחד לאחר.

פקעת ההרחה (Olfactory Bulb)

תחנת הממסר הראשונה במוח המשתתפת בתהליך ההרחה. היא מקבלת מידע מתאי OSN ומעבירה מידע על ריחות לאזורים אחרים במוח.

גְלוֹמְרוֹלוֹס (Glomerulus)

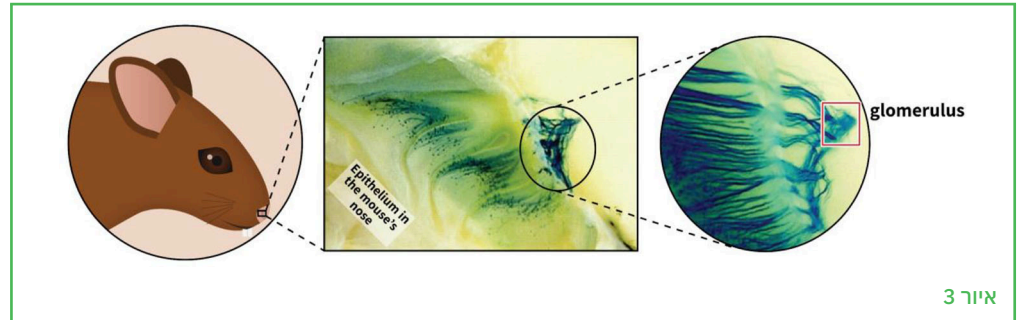
אזור בפקעת ההרחה שבו מתרכזים כל תאי המבטאים קולטן מסוים.

איור 3

ארגון תאי ה-OSN. באפם של עכברים יש מיליון תאי OSN. כל תא OSN מבטא רק גן אחד של קולטן מסוים, כך שכל סוג של קולטן ריח מתבטא בכ-10,000 תאי OSN הפרוסים ברחבי אפיתל האף (מסומנים בנקודות כחולות קטנות בתמונה המרכזית). כל תא OSN שולח את המידע החשמלי שלו דרך אקסון (סיבים כחולים) למיקום ייחודי בפקעת הריח, הנקרא גְלוֹמְרוֹלוֹס (בריבוע אדום מימין). הסיבים של כל 10,000 תאי ה-OSN המבטאים את אותו הקולטן מתכנסים באותו גְלוֹמְרוֹלוֹס. תאי חישה המבטאים קולטנים שונים (התמונה נלקחה מ-[4]).

Epithelium in the mouse's nose = אֶפִּיֶתֶל באף העכבר
Glomerulus = גְלוֹמְרוֹלוֹס.

את התשובה לשאלות הללו גילינו באמצעות טכניקה מתקדמת שצובעת רק תאי עצב המבטאים את אותו גן קולטן. תאי ה-OSN פרוסים באפיתל האף באופן אקראי על פני שטח גדול (איור 3). השלוחות שלהם (סיבים הנקראים אֶקְסוֹנִים) מגיעות עד לתחנת הממסר הראשונה במוח שמעבדת ריח, והיא נקראת פקעת ההרחה. כל תאי ה-OSN המבטאים קולטן ייחודי מתכנסים לאזור מסוים בפקעת ההרחה, הנקרא גְלוֹמְרוֹלוֹס איור 3, מימין). בסך הכול ישנם 1,000 גְלוֹמְרוֹלוֹס נפרדים בפקעת הריח, וכל אחד מהם מקבל אותות חשמליים מכל תאי ה-OSN (10,000) המבטאים גן של קולטן מסוים [4].



איור 3

פעילותם של תאי העצב של מערכת חוש הריח (OSN)

מה קורה כאשר בעל חיים נחשף לריח מסוים (תיבה 1)? ריחות מורכבים ממולקולות רבות (למשל, במקרה של הוורד יש יותר מ-400 מולקולות [6]). כפי שראינו, כל מולקולת ריח מפעילה קבוצה מסוימת של כ-10,000 תאי OSN שמתכנסים אל גְלוֹמְרוֹלוֹס מסוים בפקעת הריח ומפעילים אותו. ריח של ורד, למשל, מפעיל קבוצה שונה של גְלוֹמְרוֹלוֹס מזאת המופעלת כשמריחים שוקולד. זה אומר שריחות מסוימים יוצרים דפוסים מסוימים ("מפות") של פעילות הגְלוֹמְרוֹלוֹס במוח.

תיבה 1. מערכת חוש הריח בחיות

היכולת לקלוט ריחות ולהבדיל ביניהם חשובה מאוד לבעלי חיים רבים; חוש הריח היה כנראה החוש הקדום ביותר שהתפתח באורגניזמים. ישנם קווי דמיון רבים בין המערכות של חוש הריח של בעלי חיים שונים. לדוגמה, מערכת חוש הריח של זבובי הפירות, בדומה לזו של בני אדם ושל מכרסמים, מכילה תאים מסוימים, כאשר כל אחד מהם מזהה מספר קטן יחסית של מולקולות ריח [5]. התאים של קולטני הריח של זבובי פירות המבטאים את אותו הקולטן (הממוקמים על שני המחוששים שלהם) מתכנסים גם הם אל אותו גְלוֹמְרוֹלוֹס. עם זאת, לזבובי פירות יש פחות גְלוֹמְרוֹלוֹס מאשר לבני האדם (כ-60 אצל הזבובים, לעומת 1,000 בבני אדם). הדמיון בין המערכות של חוש הריח של הזבובים לבני אלו של בני האדם מאפשר למדענים להסיק מסקנות חשובות לגבי מערכת חוש הריח האנושית, כיוון שקל יותר לחקור זבובי הפירות מאשר בני אדם. על אף הדמיון, ישנם גם הבדלים מרכזיים בין מערכות חוש הריח של בני אדם ושל הזבובים, וריחות שנחשבים נעימים או לא נעימים לבני אדם לא בהכרח יחוו באותה הצורה אצל הזבובים, ולהפך.

כיום אנחנו מסוגלים להסתכל במבט-על על פקעת הריח של מכרסמים באמצעות טכניקות הדמיה עצבית, "לקרוא" את דפוסי הארגון המרחבי (ה"מפה") של הפעילות העצבית, ומתוך פעילות זו "לפענח" מהו הריח שבו נתקלו המכרסמים. זוהי שיטה חדשה מצוינת לזיהוי ריחות, אך כמובן שאין זו הדרך שבה החיה מזהה ריחות, כיוון שאין לה מיקרוסקופ הדמיה

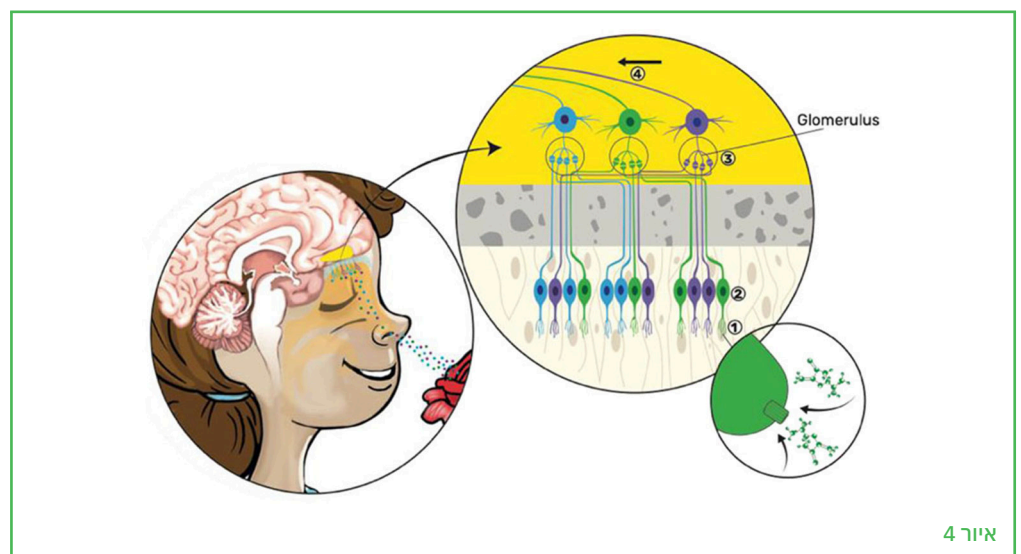
בפקעת הריח שלה, והיא אינה יכולה להסתכל מבחוץ על הפעילות העצבית שלה כפי שעושים המדענים.

למרות שאיננו מבינים לגמרי את היכולת המרתקת של המוח לזהות ריחות, אנחנו יודעים שתאי העצב בפקעת הריח שולחים את האקסונים שלהם לאזורים רבים במוח (איור 4). חלק מהאזורים הללו אחראים להתנהגויות אוטומטיות המתרחשות בתגובה לריחות. לדוגמה, כאשר בעל חיים נתקל בריח מסוים המצביע על גורם סכנה, כמו כשעכבר נתקל בריח של חתול, מופעלת אצלו תגובה אוטומטית של "ברח!". פרט לאקסונים המגיעים לאזורים אלו, ישנם אקסונים אחרים הנשלחים מפקעת הריח לאזורי המוח שבהם מתרחשת למידה. כך בעלי החיים לומדים תגובות התנהגותיות מסוימות על סמך הריחות שבהם הם נתקלים [3].

איור 4

הארגון האנטומי והפונקציונלי של מערכת חוש הריח. (משמאל)

מולקולות הריח נכנסות לאף ונקשרות לקולטנים שבתאי ה-OSN. כל תא OSN מבטא רק סוג אחד של קולטן ריח ("אצבעות" בצבע שונה). האקסונים של תאי ה-OSN חוצים את עצם האף ונכנסים לתחנת הממסר הראשונה של מערכת חוש הריח במוח – פקעת ההרחה (המסומנת בצהוב). (מימין) תקריב של האזור המסומן על ידי החץ. (1) תאי ה-OSN המבטאים את אותו הקולטן נקשרים רק למולקולות ריח מסוימות (מבט מקרוב על תא OSN "ירוק"). (2) תאי ה-OSN המבטאים את אותו הקולטן (מסומן בצבע) מפוזרים בכל אפיתל האף. (3) תאי ה-OSN המבטאים את אותו הקולטן שולחים את האקסונים שלהם לאותו גלומרולוס. (4) מידע עובר מפקעת ההרחה לאזורים אחרים במוח האחראים להתנהגות אוטומטית או נרכשת (שלומדים אותה). (התמונה נלקחה מתוך: פרס נובל).



איור 4

רוב רובן של התגובות האנושיות לריחות הן מהסוג השני – נרכשות (כלומר, כאלו שלומדים אותן) ולא אוטומטיות. אנשים משייכים משמעויות נרכשות לריחות מסוימים, והמשמעויות האישיות הללו משפיעות על התגובות שלהם לריחות. לדוגמה, אנשים שהייתה להם פגישה ראשונה רומנטית הכוללת יין, יכולים ללמוד לקשר את ריח היין הזה עם תחושת האהבה. לאחר מכן, כשהם מריחים יין, הם מרגישים "פרפרים בבטן" ורוצים ליצור קשר עם יקיריהם.

משמעות הדבר היא שלאנשים עשויות להיות תגובות התנהגותיות ייחודיות לריח מסוים בהתאם לחוויות שבהן הריח היה נוכח (תיבה 2). עבור חלקנו, הרחת ורד קשורה לחוויה רגשית נעימה (כמו אהבה), ואילו עבור אחרים ייתכן שהוורד קשור לצבע האדום, שאולי הם מקשרים לדם ולפחד. אם המוחות של כל אחד מאיתנו מגיבים לאותה מולקולת ריח בצורה שונה, האם כששני אנשים מריחים ריח מסוים, הם באמת חווים את אותו הריח?

תיבה 2. חוש הריח והגיל

חוש הריח נוטה להיחלש ככל שאנחנו מזדקנים. יכולתנו פוחתת לזהות ריחות חלשים או להבדיל בין ריחות. יש לכך מספר גורמים, בכללם ירידה במספר קולטני הריח, וירידה בתפקודם של אזורי מוח

מסוימים. מעניין לציין כי מחקרים עדכניים הראו שאובדן חוש הריח הוא סימן מקדים למחלת האלצהיימר, ויכול לסייע באבחון המחלה יותר מ-10 שנים לפני הופעת תסמינים הקשורים לזיכרון.

האם התפוז שלי מריח כמו התפוז שלך?

דמיינו שאנשים שמעולם לא ראו או הריחו תפוז מבקשים מכם לתאר את ריח התפוז. האם אתם יכולים לנסח זאת במילים? סביר להניח שלא – תפוזמריח כמו תפוז, ואנחנו לומדים לזהות את ריחו מתוך אֶסוֹפְיָאָיָה (קישור בין רעיונות או מחשבות כך שהופעתו של האחד בתודעה גוררת אחריה את העלאתו של האחר). כאשר אנחנו רואים תפוז, אנחנו מריחים אותו בו-זמנית; אפילו אם אנחנו מריחים אותו בחושך, אנחנו יודעים שזה תפוז על ידי קישור בין הריח לבין מראה התפוז, או השם "תפוז". במובן זה, הרחה שונה מהותית מראייה; אם אנשים שמעולם לא ראו תפוז בעבר שואלים אתכם איך נראה תפוז, תוכלו לומר שהוא עגול, כתום, בערך בגודל של כדור טניס, בעל מרקם חלק וכדומה. אנחנו יכולים ליצור דימוי פנימי של עצם כלשהו, אך איננו יכולים באמת ליצור דימוי פנימי של ריח.

אם אין ביכולתנו לתאר ריחות באמצעות מילים, ואיננו יכולים ליצור דימוי פנימי של ריחות, איך אנחנו יודעים שכשאנחנו מריחים תפוז, כולנו חווים ריח זהה? התשובה היא שאיננו יודעים! כפי שצינתי קודם לכן, סביר להניח כששני אנשים מריחים תפוז בפעם הראשונה, כל אחד מפעיל דפוסים שונים של פעילות של תאי העצב – כל אחת במוחה שלה, וכל אחד במוחו שלו. עם זאת, כולנו מקשרים את הריחות הללו לאותו הפרי כיוון שכולנו רואים את התפוז. מעבר לקישור שאנחנו עושים בין הריח לבין החפץ שנקרא "תפוז", האם אנחנו חווים את הריח בצורה דומה? ייתכן, אך הריחות שאנחנו חווים עשויים להיות יחסיים לכל שאר הדברים שהרחנו בחיינו. למשל, הריח של תפוז דומה יותר לריח של לימון מאשר לריח של קפה – זה נכון מבחינת כולנו. זה אומר שהדמיון בין האופן שבו אנשים תופסים ריחות עשוי להיות יחסי בלבד – כולנו מסכימים שהריח של משהו מסוים דומה יותר לריח של דברים מסוימים לעומת אחרים. זוהי תזכורת טובה לכך שתפיסת הריחות שלנו אינה מוחלטת – בניגוד לתפיסה שלנו לגבי הצבע האדום, למשל, שמתבססת על תדר קבוע של אור.

חידת התפיסה: שאלה פתוחה עבור המדענים העתידיים

ישנה שאלה חשובה ומורכבת לגבי תפיסה, שהמדענים טרם מצאו לה תשובה. שאלה זו שייכת לחוש הריח, אך גם לשאר החושים, ולכן היא עקרונית מאוד: כיצד מתרחשת הפרשנות של המידע החושי?

כפי שצינו, כשהמוח מעבד מידע שמקורו בחושים, נוצר דפוס מסוים של פעילות חשמלית בקבוצה ייחודית של תאי עצב במוח. דפוס הפעילות העצבית מייצר במוח ייצוג של העולם הפיזי. דפוס הפעילות הללו אינם קבועים מבחינת הזמן (כלומר, הם מתרחשים בזמנים שונים) ומבחינת המרחב (באזורים שונים במוח). כל העושר והמגוון של העולם הפיזי מיוצג בצורה כלשהי על ידי פעילות חשמלית של קבוצות ייחודיות של תאי עצב בזמנים מסוימים ובמקומות מסוימים במוח.

המדענים מסיקים מכך שני דברים: ראשית, שהמוח יוצר תמונה מופשטת של המציאות הפיזית; ושנית, שהמוח צריך לפרש את המידע המופשט הזה, ומעניק לו משמעות. עצם שקיים בעולם החיצוני, כמו תפוז, מתורגם לדפוס מסוים של פעילות חשמלית המייצגת אותו במוח. לאחר מכן, המוח "מפענח" את המשמעות של אותה פעילות חשמלית על ידי פרשנות של הפעילות הזו – ישנו תפוז הקיים בעולם. כמו כן, על המוח לקשר בצורה כלשהי את דפוס הפעילות הזה למשמעות מסוימת; למשל, "זה ריח של תפוז; הריח מייצר בי רגשות חיוביים כי הוא מזכיר לי את הפרדס שבו ביקרתי לפני כמה שנים...". נכון לעכשיו, ה"קפיצה" המפתיעה הזו מהפעילות החשמלית במוח לפרשנות ולמשמעות שאנחנו משייכים לה היא תעלומה אמיתית – עוד לא הבנו איך זה קורה. אני מאמין שהמעבר ה"קסום" הזה הוא החידה הגדולה הבאה הניצבת בפני מדעני המוח העתידיים. אולי אתם תהיו ביניהם?

המלצות למוחות צעירים

בעיניי יש דרך פשוטה מאוד לבחור מה לעשות בחיים. לא משנה במה תבחרו – בין שאתם רוצים להיות מדענים או בנאים. אך מה שזה לא יהיה, הקפידו לבחור תחום שאתם אוהבים, התמסרו לעבודתכם והשקיעו בה את מירב המאמצים וההתלהבות. זה הכול! עליכם לטפח את התשוקה למה שאתם עושים. תשוקה זו, הניזונה ממיומנות ומידע, תניע אתכם למצוינות. עליכם לגלות את תחום העניין שלכם, ואז להעמיק בו ככל יכולתכם. כאשר תשוקה וידע הולכים יד ביד, זהו מתכון ליצירתיות ולאוויר.

חומרים נוספים

Ted-Ed: כיצד אנחנו מריחים? (אנגלית)

<https://www.youtube.com/watch?v=snJnO6OpjCs>.

תודות

ברצוני להודות לנועה שגב על עריכת הריאיון שהיווה את הבסיס למאמר זה ועל כתיבה משותפת של המאמר, לשרון עמלני על האיורים, ולסוזן דיבד (Susan Debad) על העריכה הלשונית של כתב היד באנגלית. תודה מיוחדת להרן שני-נרקיס על הערותיו החשובות לכתב היד.

מקורות

1. Duchamp-Viret, P., Duchamp, A., and Chaput, M. A. 2003. Single olfactory sensory neurons simultaneously integrate the components of an odour mixture. *Euro. J. Neurosci.* 18:2690–6. doi: 10.1111/j.1460-9568.2003.03001.x
2. Buck, L., and Axel, R. 1991. A novel multigene family may encode odorant receptors: a molecular basis for odor recognition. *Cell.* 65, 175–87. doi: 10.1016/0092-8674(91)90418-X

3. Axel, R. 2005. Scents and sensibility: A molecular logic of olfactory perception (Nobel lecture). *Angewandte Chemie Int. Edn.* 44:6110–27. doi: 10.1002/anie.200501726
4. Mombaerts, P., Wang, F., Dulac, C., Chao, S. K., Nemes, A., Mendelsohn, M., et al. 1996. Visualizing an olfactory sensory map. *Cell.* 87:675–86. doi: 10.1016/S0092-8674(00)81387-2
5. Wilson, R. I. 2013. Early olfactory processing in *Drosophila*: mechanisms and principles. *Ann. Rev. Neurosci.* 36:217 . doi: 10.1146/annurev-neuro-062111-150533
6. Shalit, M., Guterman, I., Volpin, H., Bar, E., Tamari, T., Menda, N., et al. 2003. Volatile ester formation in roses. Identification of an acetyl-coenzyme A. Geraniol/citronellol acetyltransferase in developing rose petals. *Plant Physiol.* 131:1868–76. doi: 10.1104/pp.102.018572

פורסם אונליין: 19 בספטמבר 2024

נערך על ידי: Idan Segev

מנטור מדעי: Adi Fledel Alon

ציטוט: Axel R (2024) מערכת חוש הריח: החיים מריחים טוב. *Front. Young Minds.* doi: 10.3389/frym.2022.1022504-he

תורגם והתאם מ: Axel R (2023) The Olfactory System: It Smells Good To Be Alive. *Front. Young Minds* 10:1022504. doi: 10.3389/frym.2022.1022504

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

זכויות יוצרים © 2022 © Axel 2024. זהו מאמר בגישה פתוחה שמופץ תחת תנאי רישיון [Creative Commons Attribution License \(CC BY\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/). 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

PELEG, גיל: 10

אני משחק טניס ואוהב לשחות. אני גם מנגן בפסנתר, משחק כדורסל, ומשחק הרבה במחשב. אני אוהב מאוד לראות סרטים, ואוהב לשחק עם משפחתי ועם חבריי.

הכותבים

RICHARD AXEL

פרופסור ריצ'רד אַקְסֶל הוא ביולוג מולקולרי במחלקה למדעי המוח באוניברסיטת קולומביה (ניו יורק, ארצות הברית).



הוא נולד ב-1946 בברוקלין שבניו יורק. כיוון שהיה גבוה, שיחק כדורסל בשנות נעוריו. הוא למד ספרות באוניברסיטת קולומביה. לאחר שנחשף שם לתחום הביולוגיה המולקולרית, הוא נהיה עוזר מחקר בתחום זה. פרופ' אקסל למד בבית הספר לרפואה באוניברסיטת ג'ונס הופקינס (Johns Hopkins); מרילנד, ארצות הברית), ובשנת 1971 קיבל הסמכה לרופא. לאחר מכן, הוא חזר לאוניברסיטת קולומביה כדי לעסוק שוב במושא עניינו – הביולוגיה המולקולרית – וקיבל שם את תואר הפרופסור ב-1978. הוא פיתח טכניקות של העברת גנים שאפשרו להשתיל DNA זר בכל תא ולייצר מספר גדול של חלבונים בעלי חשיבות קלינית. הטכניקות הללו אפשרו גם לבדוד את הגן של הקולטן התאי CD4 עבור נגיף HIV, הגורם לתסמונת הכשל החיסוני הנרכש (אייДС). פרופ' אקסל יישם את כלי הביולוגיה המולקולרית בתחום מדעי המוח, וחשף יותר מאלף גנים הקשורים לדרך שבה תופסים ריח. בשנות הקריירה המדעית שלו, פרופ' אקסל זכה בפרסים ובתארים רבים, ביניהם פרס נובל בתחום של פיזיולוגיה או רפואה לשנת 2004, פרס צלחת הזהב של האקדמיה האמריקאית להישגים (2005), ומדליית הסליל הכפול (2007). יש לו שני בנים – אדם ויונתן, והוא נשוי לפרופסורית קורי ברגמן (Cori Bargmann), גנטיקאית התנהגותית באוניברסיטת רוקפלר. *ra27@columbia.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



קרן פשפחת
שעשוע
Shashua
Family Foundation

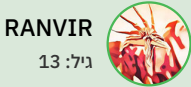
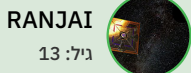


הקסמים של נוזלי-העל מנצחים את כוח המשיכה

Michael Kosterlitz*

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

סוקרים צעירים

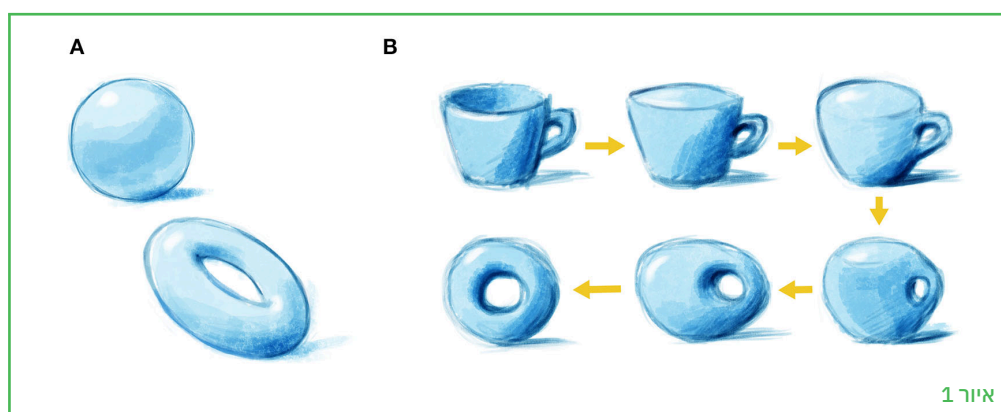


פיזיקה היא אחד הכלים הטובים ביותר העומדים לרשותנו לפתרון החידות הקיימות בעולם, החל מעיסוק בתופעות נפוצות שאתם רואים סביבכם, כמו משב הרוח בענפי העצים, ועד לשאלות על תופעות נדירות ומסתוריות שמתרחשות רק בתנאים מסוימים. המסע שלי בתחום הפיזיקה הוביל אותי לבחון תופעה מיוחדת מאוד, שבה נוזל רגיל מתקרר ופתאום 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 מעבְרֵי 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 ניהלף 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. מבוּדְד 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.

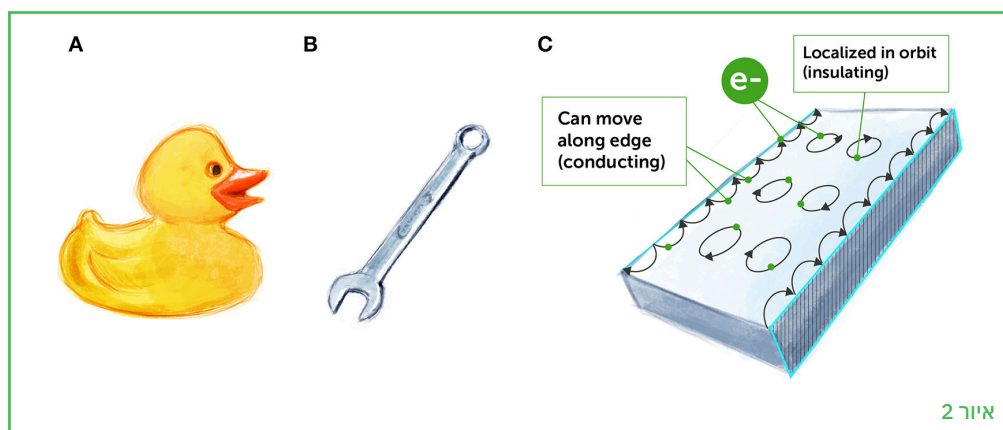
קיימת קבוצה מסוימת של חומרים מבודדים שמשכה עניין רב בחמש-עשרה השנים האחרונות. חומרים אלו נקראים **מבודדים טופולוגיים** [1], כיוון שאפשר לסווג אותם ולתאר אותם באמצעות שמורות טופולוגיות. מבודדים טופולוגיים הם מיוחדים, משום שהם גם מוליכים וגם מבודדים בו זמנית. איך זה ייתכן? בחלק האמצעי של החומרים הללו, 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 למגדה, 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.

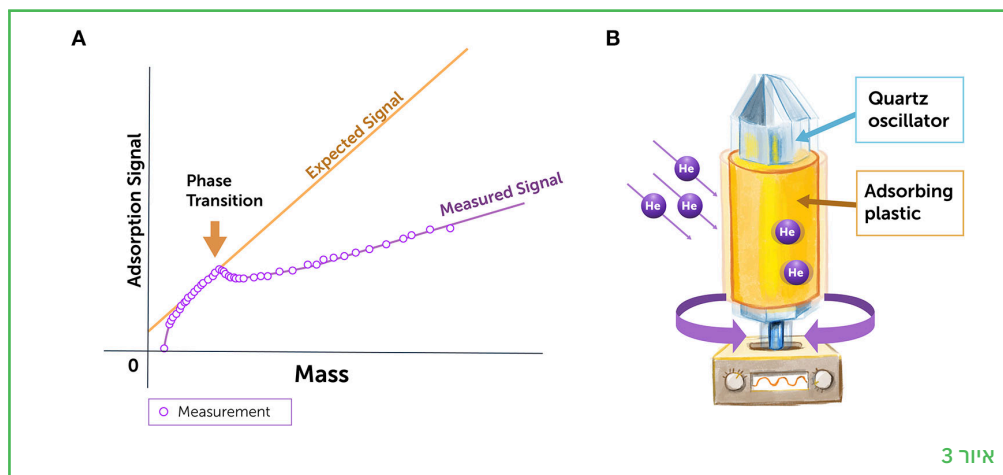
(A) כאשר נספחו לפני השטח של הגביש כמה שכבות דקות של הליום קר, תדירות התנודה של גביש הקוורץ שנמדדה הייתה שונה מתדירות התנודה שציפנו לה. אות הספיחה (adsorption signal) מייצג את תדירות התנודה, והמסה מייצגת את כמות הליום שנספח על פני הגביש. הליום במצבו הרגיל מגדיל את המסה המתנודדת, ומקטין את תדירות התנודה 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 הדיספיפציה. 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.

דיספיפציה

(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 דיספיפציה. 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 דיספיפציה, 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)

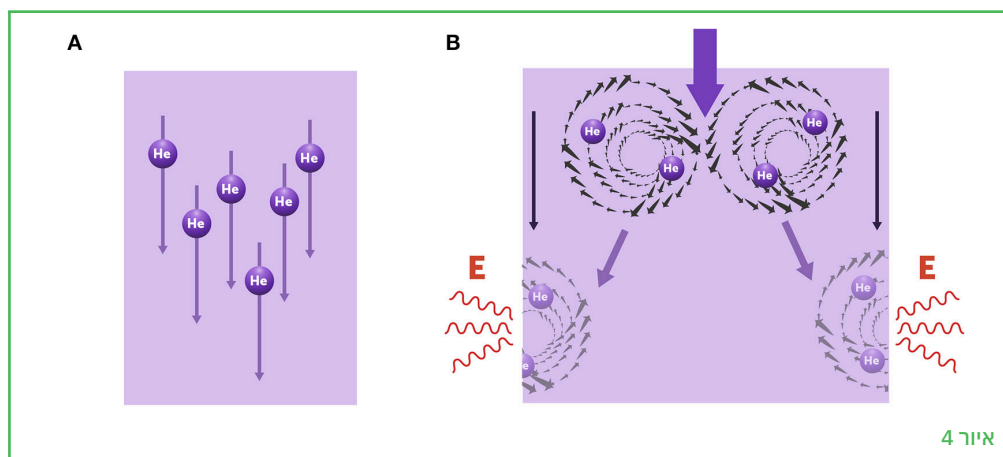
מעבר פתאומי בין שני מצבים של מערכת שבהם מאפייני המערכת משתנים. למשל, מעבר של מים ממצב צבירה נוזלי למצב צבירה מוצק – קרח.

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.

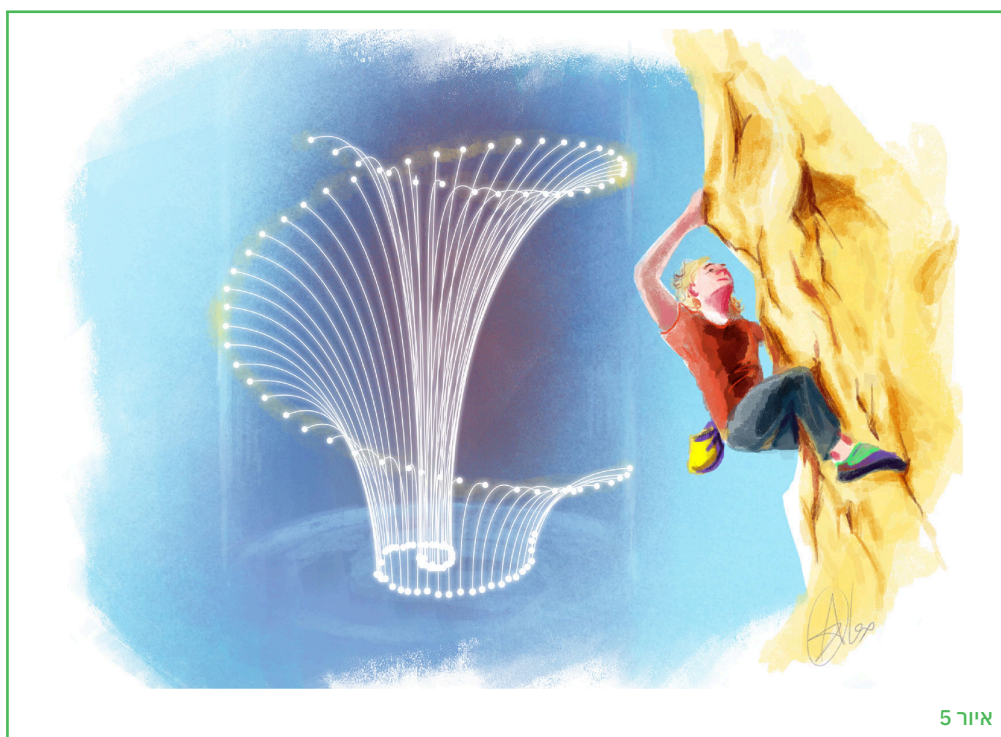
ברצוני לסיים בכמה הערות אישיות לקוראים הצעירים על אהבתי למתמטיקה ולפיזיקה ובהמלצות שלי לחיים מאושרים.

המלצות למוחות צעירים סמלים נפלאים: היופי שבמתמטיקה ובפיזיקה

כשהתוודעתי לאלגברה בבית הספר חשבתי לעצמי, "איזה יופי! זו דרך הרבה יותר טובה מְקָשֶׁבֶן לפתור בעיות!", מפני שהאלגברה אפשרה לי לעשות הרבה פעולות מתמטיות שקודם לכן לא יכולתי לעשות בקלות. הרגשתי כאילו מישהו הדליק את האור ואפשר 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 בהֶרְפֻטולוגיה (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 הרפטולוגיה, אני אוהב לעסוק באוריגמי אבל לא מודולרי. בימים אלו אני גם קורא מסיפורי המיתולוגיה היוונית.

גיל: 14, YARDEN

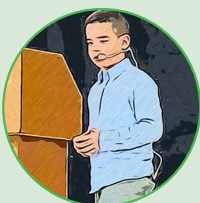
נולדתי וגדלתי בישראל. התחביבים העיקריים שלי הם קמ"י (קרוב מגן ישראלי) ורטוריקה. יש לי חגורה חומה בקמ"י, וזכיתי במקום השני בתחרות "הנואם הצעיר" בישראל. אני גם בתנועת הנוער הצופים, ואוהב לשיח.

הכותבים

MICHAEL KOSTERLITZ

פרופ' מייקל קוסטרליץ הוא פיזיקאי בריטי-אמריקאי שנולד למשפחה של מהגרים יהודים באַבֶּרְדִין, סקוטלנד (Aberdeen, Scotland). אביו האנס (Hans) קוסטרליץ היה נירו-פֶרְמֶקולוג הידוע כאחד מהמגלים 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 חָלַק 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



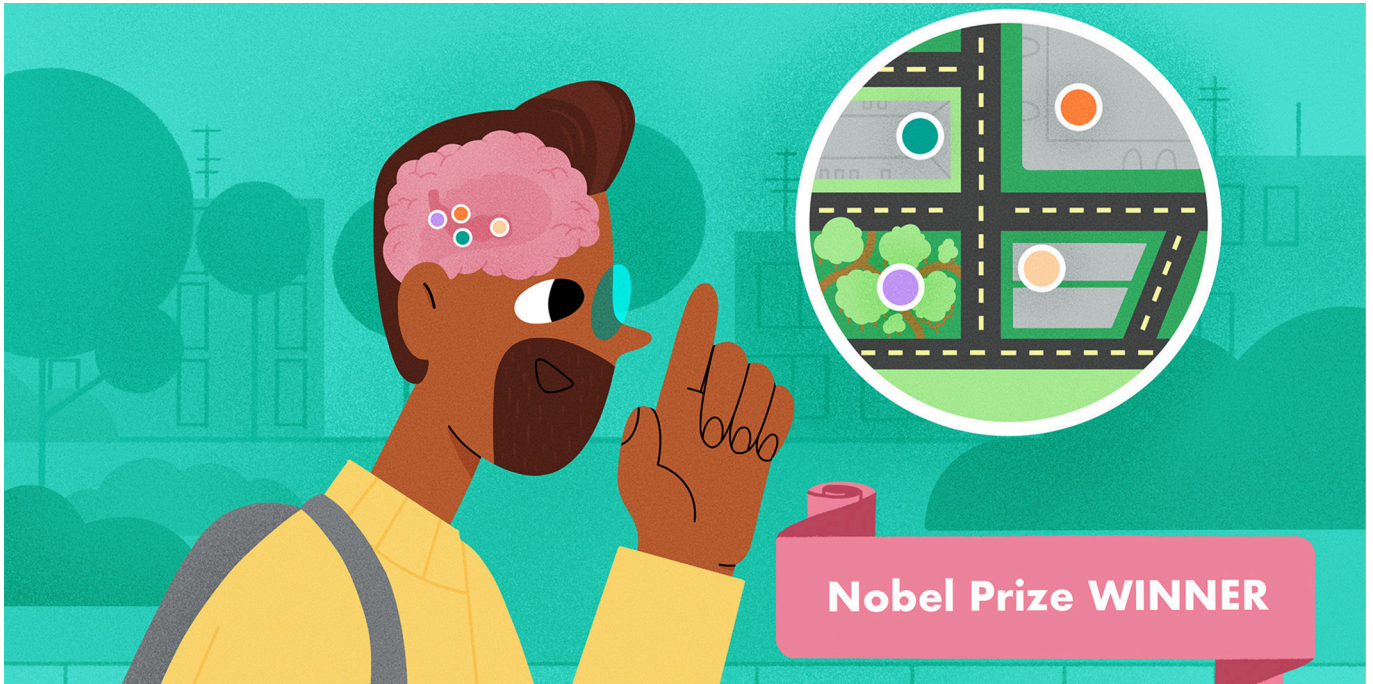
הוצאת פרונטירז מדע לצעירים ישראל
Hebrew version provided by



THE SAGOL NETWORK



קרן בשפחת
שעשוע
Shashua Family Foundation



תְּאִי מִיקוּם: תְּאִי הַמוֹחַ שֶׁעוֹזְרִים לָנוּ לִמְצוֹא אֶת דְּרַכְנוּ בְּעוֹלָם

John O'Keefe*

מרכז סיינסבורי וולקם והמחלקה לביולוגיית התא ולביולוגיה התפתחותית, יוניברסיטי קולג' לונדון, לונדון, אנגליה

סוקרים צעירים

GEORG
גיל: 12



SUYANG
גיל: 15



אחת היכולות הבסיסיות והחשובות ביותר של בני האדם ושל בעלי חיים היא ההתמצאות במרחב. היכולת הזאת היא פה טבעית, שבדרך כלל אנחנו עושים זאת כלאחר יד, בלי להקדיש לכך מחשבה מיוחדת. למרות שאנחנו מתמצאים בסביבתנו בקלות רבה, זוהי למעשה פעולה שכדי לבצעה יש צורך במנגנון מורכב ומרתק – מערכת הניווט במוח. במאמר זה נתוודע לקבוצה גדולה של תאים המהווים חלק ממערכת ניווט זו – תְּאִי הַמִּיקוּם. בקריאת המאמר תגלו כיצד תכונת הסקרנות עוזרת למערכת הניווט של המוח בפעולתה, ותלמדו כמה לקחים חשובים מנהגי המוניות בלונדון!

פרופסור ג'ון אוֹקִיף (John O'Keefe) זכה בפרס נובל בתחום של פיזיולוגיה או רפואה לשנת 2014 עם הפרופסורית מִי־בריט מוֹסֶר (May-Britt Moser) והפרופסור אדוֹרד מוֹסֶר (Edvard Moser) על גילוי התאים המהווים את מערכת המיקום במוח.

כשאתם חושבים על ניווט מנקודה אחת לנקודה אחרת, מה הדבר הראשון שעולה במחשבתכם? האם זו מערכת ה-GPS שיש בניידים החכמים? או אולי מפת השטח

שקיבלתם בטיול האחרון של הצופים? כשחושבים על זה לעומק, אנחנו מנווטים ממקום למקום כל הזמן בחיי היום-יום שלנו – אפילו כשאנחנו מוציאים את הכלב לטיול או הולכים למכולת כדי לקנות את החטיף האהוב עלינו. המוח שלכם מפעיל את מערכת הניווט שיש בו, גם אם גופכם אינו מְנַגֵּט בפועל ואתם נוסעים באוטובוס, ברכבת או במכונית. האם תהיתם אֵי פעם כיצד מערכת הניווט הפנימית פועלת, איך אנשים מזהים מקומות מסוימים, וכיצד אנחנו מגיעים ממקום למקום?

מסלולים לעומת מפות

לפני שנדבר על מערכת הניווט שבמוח, עלינו להיות מודעים לכמה עקרונות. העיקרון הראשון הוא ההבדל בין מסלולים לבין מפות. **מסלול** מתייחס בדרך כלל לדרך אחת המובילה ממיקומו הנוכחי של אדם למיקום מסוים אחר. אתם יכולים לחשוב על מסלול כמערכת הוראות שמובילה אדם מהמקום ההתחלתי למקום המבוקש, תוך שימוש בנקודות ציון. לדוגמה, "יתכן שאתם יודעים שאם תלכו ברחוב שלכם, תפנו שמאלה, ואז תפנו ימינה ליד בית הקפה, תגיעו למכולת. אם אתם רוצים לקנות חטיף במכולת, כל שעליכם לעשות הוא לפעול אחר ההוראות וללכת בעקבות ציוני הדרך האלה, ואינכם צריכים לדעת מה המרחק בין הבית שלכם למכולת, או אילו רחובות וחניויות אחרות נמצאים בסביבה.

אולם מה יקרה אם הרחוב שלכם יִקְסָם בגלל עבודות בנייה, או אם בית הקפה יוחלף בחנות בגדים? האם עדיין תדעו ללכת מהבית שלכם למכולת, רק לפי ההוראות המוכרות לכם? התשובה היא לא – תצטרכו מִפָּה כדי להגיע למכולת בתנאים החדשים. זהו המְפָתֵחַ להבנת מערכת הניווט של המוח. כפי שאתם מבינים מדוגמת המכולת, כדי לנווט בהצלחה בעולם, צריך להיות במוח שלכם **ייצוג פנימי** של המקומות המתאימים, כמו גם של היחסים שבין אותם המקומות. הייצוג שיוצר **מִפָּה מנטלית** של סביבתכם מאפשר לכם לנווט בעולם בגמישות – כך אתם יכולים לחשוב על מסלולים רבים שמובילים לאותו המקום. הגמישות הזאת כֹּה חשובה, עד שִׁחיות בחרות לעיתים קרובות "להתאמץ" ולהשתמש במסלולים שונים, בִּמְקוֹם להשתמש רק בדרך מוכרת אחת. במילים אחרות, המפה המנטלית היא האסטרטגיה המועדפת במוחותיהם של בְּעָלֵי החיים המאפשרת להם לנווט בסביבתם.

תָּאֵי מִיְקוּם

מפת המיקומים המנטלית הזאת נוצרת במוח באמצעות תאים מיוחדים הנקראים **תָּאֵי מִיְקוּם** [1]. תָּאֵי המיקום נמצאים באזור במוח הנקרא **היפוקמפוס**, המכיל חֵלֶק נכבד ממערכת הניווט במוח (**איור 1A**). מתברר שכל תא מיקום מגיב למיקום מסוים בעולם. משמעות הדבר היא שכאשר בעל חיים משוטט בסביבתו, תא מיקום מסוים מופעל כאשר בעל החיים נמצא במיקום מסוים במרחב (**איור 1B**).

הנה דוגמה מהחיים האמיתיים שמראָה איך הפעילות של תָּאֵי המיקום יוצרת מפה במוח. כשאתם נמצאים במקום מסוים בשכונה שלכם, למשל בגינה שליד הבית, קבוצה מסוימת של תָּאֵי מיקום פועלים. פעילותו של כל תא מבוססת על המיקום המסוים שבו אתם נמצאים בגינה. כשאתם נמצאים בְּמְקוֹם אחר בשכונה שלכם, נניח בחצר בית הספר, קבוצה אחרת

מפה מנטלית (Mental Map)

ייצוג של מקומות בעולם ושל היחסים ביניהם, הנבנים במוחו של בעל חיים כשהוא חוקר את סביבתו.

תָּאֵי מִיְקוּם (Place Cells)

תָּאֵי עֶצֶב במוח שעוזרים בבניית המפה המנטלית. הם ממוקמים בהיפוקמפוס ונכנסים לפעולה כשבעל חיים נמצא במיקום מסוים בסביבתו.

היפוקמפוס (Hippocampus)

אזור שצורתו מזכירה סוסונים הממוקם עמוק במרכז המוח – בין האוזניים, הוא מכיל את תָּאֵי המיקום, המהווים חֵלֶק חשוב ממערכת הניווט של המוח.

איור 1

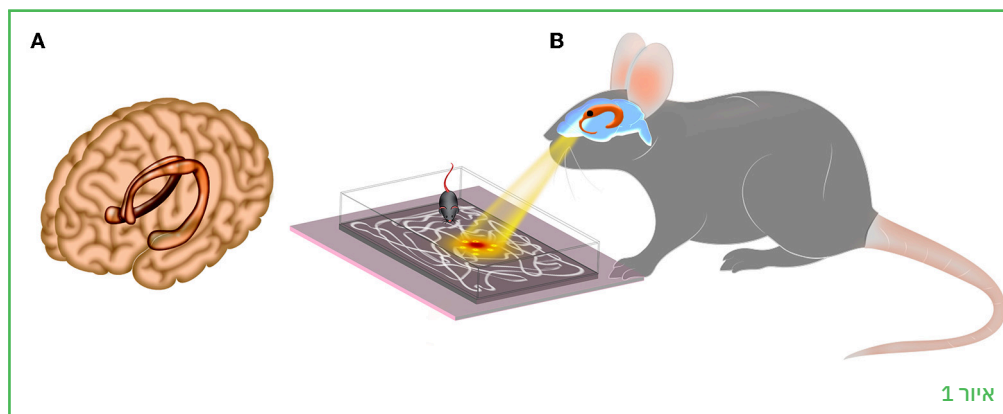
תְּאֵי מִיקוּם בַּהִיפּוֹקֶמְפּוּס.
(A) ההיפוקמפוס הוא אזור המזכיר בצורתו סוסון-ים, הממוקם עמוק במרכז המוח (כתום). יש בו סוגים שונים של תאים, וביניהם תְּאֵי עֶצֶב ההכרחיים לניווט, הנקראים תְּאֵי מִיקוּם. (B) כאשר בעל חיים נע במרחב שסביבו (הקווים האפורים שבקופסה), תא מיקום מסוים בַּהִיפּוֹקֶמְפּוּס שלו (הנקודה השחורה בהיפוקמפוס של העכבר) מופעל חשמלית כאשר בעל החיים נמצא במקום מסוים (נקודה כתומה בקופסה). הפעילות הזאת המתרחשת בתאים עוזרת לבעל החיים לבנות מפה מנטלית של הסביבה, ומאפשרת לו לנווט בעולם בחופשיות (קרדיט לתמונה:

<https://medicalxpress.com/news/2015-10-role-hippocampus-memory.html>
<https://www.nobelprize.org/uploads/2018/06/advanced-medicineprize2014.pdf>

איור 2

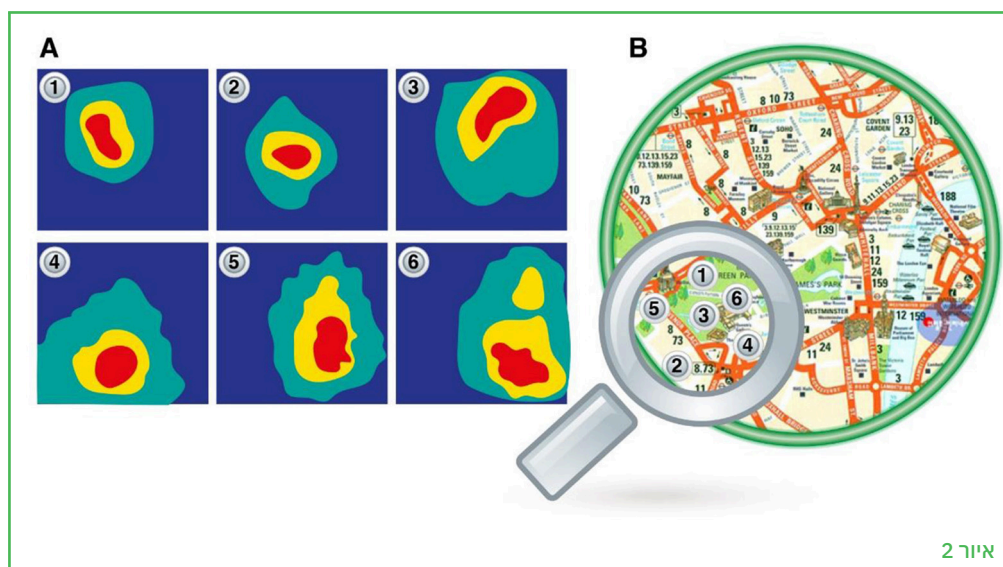
תְּאֵי מִיקוּם יוֹצְרִים מִפּוֹת פְּנִימִיּוֹת בְּמוֹחַ. (A) דוגמה לפעילות של שישה תְּאֵי מיקום בודדים המיקום בסביבה שבו כל תא פעיל ביותר מיוצג על ידי האזור האדום. אזורים צהובים וירוקים מייצגים פעילות פחותה, וכחול מייצג חוסר פעילות. כל תא פעיל בצורה מְרִבֵּית במיקום מסוים בריבוע, התואם למיקום מסוים בסביבה. כשמסלבים אותם, השדות של כל התאים הפעילים מכסים את כל פני השטח של הסביבה. (B) הפעילות המשותפת של תְּאֵי המיקום בְּסִבִּיבָה נתונה יוצרת מפה מנטלית של אותה הסביבה במוח (האיור נלקח מ-

<https://www.nobelprize.org/uploads/2018/06/okeefe-lecture.pdf>



איור 1

של תְּאֵי מִיקוּם יפעלו – כל תא במיקום אחר בחצר (איור 2A). פעילות זו של תְּאֵי המיקום בַּהִיפּוֹקֶמְפּוּס מאפשרת לכם ליצור מפה מנטלית של השכונה שלכם (איור 2B). [2].



איור 2

מה נהגי מוניות יכולים ללמד אותנו על אודות ההיפוקמפוס?

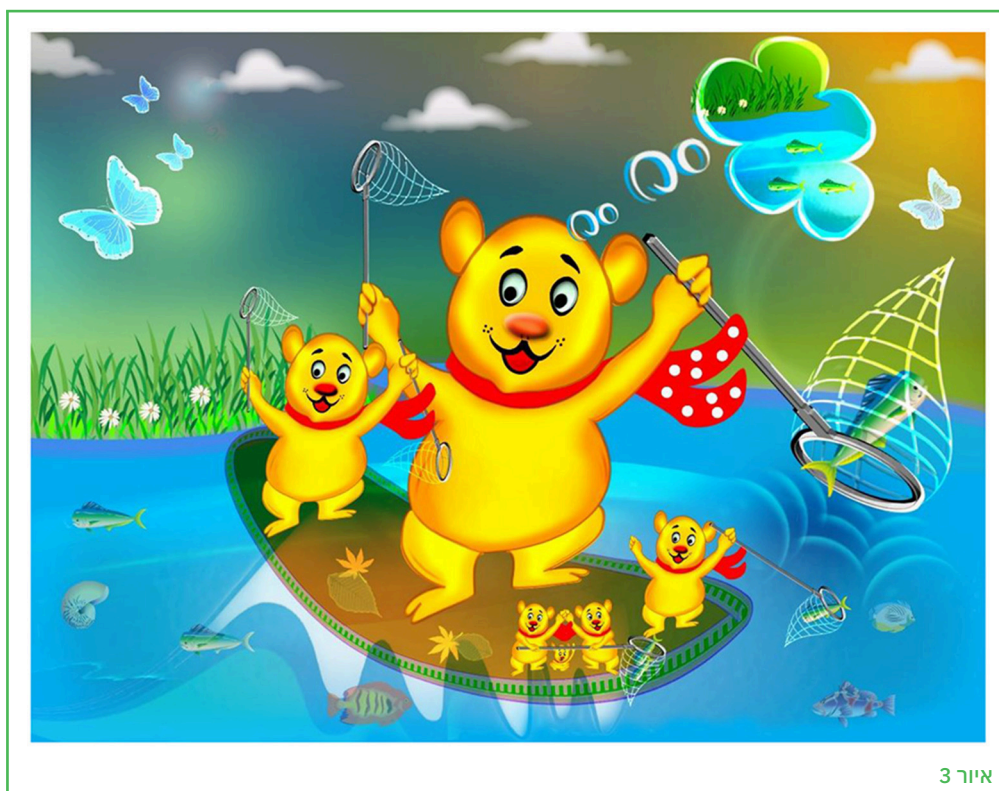
לפני עשרים שנה, לפני עידן הטלפונים החכמים המצוידים ב-GPS, אנשים ניווטו באמצעות הזיכרון שלהם. אחת האוכלוסיות שנדרשו להשתמש לעיתים קרובות בכישורי ניווט הייתה נהגי המוניות! בתקופה זו נהגי מוניות התבססו על המפות המנטליות של העיר, כפי שהצטיירו במוחם, ועל היכרותם עם תנאי התנועה בשעות מסוימות של היום כדי להסיע אנשים ממקום למקום בצורה היעילה ביותר. מחקר שנערך בשנת 2000 הראה שאזור מסוים בהיפוקמפוס אצל נהגי מוניות בלונדון היה גדול יותר מזה של אנשים שלא ניווטו בעיר בצורה נרחבת כמוהם [3]. זו הייתה רְאָיָה חשובה לכך שההיפוקמפוס מהווה חלק ממערכת הניווט של המוח. עוד הוכח כי ההיפוקמפוס של נהגי המוניות היה גדול יותר, רק כל עוד הנהגים המשיכו לנווט לפי הזיכרון, והצטמצם חזרה לגודל הרגיל אם הנהגים הפסיקו לנווט מהזיכרון.

הסקרנות מסייעת לחיות ליצור מפות מנטליות

כעת, משאנחנו יודעים שהמוח יוצר מפה פנימית של סביבתנו באמצעות תאי המיקום, הבה נחשוב על בניית המפה הפנימית הזאת מזווית אחרת. כדי לבנות מפה של הסביבה, בעל חיים חייב לשוטט ולחקור אזורים שונים בסביבתו, אולם מה מניע את החיה לעשות זאת? הגיוני שתחשבו שאם בעל חיים חש רָעָב או צָמָא תהיה לו סיבה טובה לחקור את סביבתו, אך מתברר שבְּעָלֵי חיים חוקרים את סביבותיהם אפילו יותר כשהם אינם רעבים או צמאים (איור 3) [4]!

איור 3

החיות יוצרות מפות פנימיות כשהן חוקרות את הטבע שסביבן. כשחיות מגיעות לסביבה חדשה הן חוקרות אותה מתוך סקרנות. כך הסקרנות מאפשרת לחיה ליצור מפה מנטלית של סביבתה.



איור 3

אם כך, מלבד תחושות של רָעָב וצָמָא מה יכול לעודד חיה לשוטט בסביבתה? הנה רָמָז קטן: מה אתם מרגישים כשאתם מגיעים למקום חדש? ודאי ניחשתם זאת – סקרנות! הסקרנות היא מניע עוצמתי מאוד שגורם לחיות לחקור את סביבתן. במילים אחרות, הסקרנות היא חלק מְטָבְעָנו – בהיותנו יצורים חיים – והיא מהווה נדבך במערכת בניית המפות המנטליות. המדענים מאמינים שהסקרנות נוצרה בתהליך האבולוציה, כדי להניע אותנו לחקור את סביבותינו כך שְנִמְפָּה אותן במוחנו, וכך נוכל לנווט בהצלחה ברחבי העולם. כשחושבים על כך, הסקרנות מניעה אותנו ללמוד דברים חדשים. לכן מעניין אותנו להבין אם הדחף האבולוציוני העתיק הזה – לנווט בסביבתנו – הוביל אותנו לבסוף גם לגלות סקרנות ולהתעניין בתחביבים, בכישורים ובמלאכות האהובים עלינו!

מרחב מנטלי או מרחב פיזי?

אציג בפניכם חידה פילוסופית מעניינת ומורכבת: האם אנחנו בונים את הייצוגים המנטליים של המרחב המבוססים על סביבתנו כפי שהיא בְּפִועֵל, או שאנחנו יוצרים את המאפיינים של המרחב הפיזי בהתבסס על מודל מנטלי של מרחב, שְעִימו אנחנו נולדים?

באופן אישי, אני תומך באפשרות השנייה, שעולה בקנה אחד עם רעיונותיהם של הפילוסוף הידוע עמנואל קאנט ושל הפסיכולוג אדוארד טולמן (Edward Tolman). על פי גישה זו, אנחנו נולדים עם קובץ של מְבָנִים במוח שמארגנים עבורנו את העולם בצורה מאוד מסוימת ובסיסית, כך שנוכל להבין את המידע שאנחנו קולטים על העולם באמצעות החושים שלנו. במילים אחרות, המוח מארגן ובנוי כך שנוכל לְחוֹז את העולם בצורה מסוימת בעזרת "עדשה" או "חלון" מסוימים, שדרכם אנחנו מבינים את העולם בצורה מסוימת. לפי גישה זו, משתמע שאנחנו קולטים את המרחב בצורה מסוימת, כי המוח שלנו בנוי בצורה מסוימת, ולא כי העולם החיצון הפיזי בנוי כפי שאנחנו קולטים אותו. אני מודה שקשה להבין עד הסוף את הרעיון הזה, אז חשבו על כך וראו לאן הרעיון הזה יוביל אתכם.

המלצות למוחות צעירים המלצות בהשראת המוח לקבלת ההחלטות החשובות בחיים

ברצוני לספר לכם את הסיפור האישי שלי, ולחלוק אתכם כמה תובנות שנוצרו מהתפיסה הנוכחית שלנו של המוח. היה לי קשה מאוד בלימודי בתיכון, וכשהייתי בן 18 וחשבתי על העתיד שלי, היה עליי להחליט אם אשלים עם היותי כישלון או לא. החלטתי שעליי להיות אחראי על פיתוח האישיות שלי ועל ההתקדמות בחיי, ושאיני יכול להאשים את העולם בכישלונותיי. אני ממליץ גם לכם לעשות זאת, בעזרת ההבנה שהמוח הוא איבר פעיל מאוד. אנחנו מקדישים זמן רב כדי להחליט מה לעשות, איזה מידע לקלוט, כיצד להתמודד עם המידע הזה ואיך לפרש אותו. המשמעות היא שביכולתנו להיות אחראים על הרבה מהפעולות שלנו, כמו גם על תוצאותיהן.

בנוסף לכך, אני שואב השראה ממערכת הניווט במוח. אני מאמין שעליכם לבחון את עצמכם ואת מצבכם, ולנסות לתכנן היכן אתם רוצים להיות – שאינו בהכרח תואם את המקום שבו אתם נמצאים עכשיו. אפשר לראות את מערכת הניווט של המוח כמטאפורה למציאת דרכנו בחיים. כשאתם נמצאים במקום מסוים במסלול חייכם, נסו להחליט לאיזה כיוון אתם רוצים ללכת. אולי לא תגיעו לשם – אולי תגלו שיש כל מיני מחסומים בדרך – אבל זו עדיין דרך טובה להחליט כיצד יִרְאוּ חייכם. זְכְרוּ שמסלולים רבים יכולים להוביל לאותו היעד, אז הֵיוּ גמישים, במיוחד כאשר אתם נתקלים במכשולים שמסיתים אתכם מהמסלול המקורי שלכם!

שאבו הנאה מהמדע

כדי להיות מדען טוב, עליכם לסגל השקפה אובייקטיבית על העולם, ולדעת לשנות את דעתכם בהתאם לְרָאיוֹת הניצבות מולכם. העיסוק במדע אינו מתאים לכולם, משום שיש אנשים שמתקשים בהתמודדות במצבים של חוסר ודאות הכרוכים בגילוי אמיתות בלתי צפויות. עם זאת, עבור אלה שנהנים ממסעות כאלה, הקריירה המדעית יכולה להיות אחד העיסוקים המתגמלים, המרגשים והמספקים ביותר בעיניי (איור 4). זה כמו לְחַיֵּת בסיפור בלשי שאינו נגמר, כשבכל פעם שאתם פותרים תעלומה אחת, מופיעות סוגיות מעניינות רבות אחרות!

החוכמה היא לבחור סוגייה בתחום מדעי חשוב שאפשר לפתור בעזרת כלים זמינים, או סוגיה שתוכלו לנסות לפתור באמצעות כלים חדשים שביכולתכם לפתח. כך תזכו לְחוֹז

איור 4

הנאה ממדע. כדי להיות מדענים טובים עליכם לדעת ליהנות ממסעות אל הלא-נודע וממפגשים עם אמיתות בלתי צפויות, כמו גם לשנות את דעתכם כשאתם פוגשים ברָאיות המצדיקות זאת. לא כולם נהנים ממסעות מסוג זה, אך אלו שכן, יכולים ליהנות מאוד מהעשייה המדעית. הקריירה המדעית מתגמלת, מלהיבה ומספקת מאוד!



איור 4

מדי פעם את ההתלהבות והסיפוק הנלווים להבנה שגיליתם משהו חשוב על הדרך שבה העולם עובד, והתגלית שלכם יכולה להשפיע על צורת מחשבתם של אנשים רבים, ואולי אף על חייהם. השפעה מסוג זה היא בהחלט אחד המפתחות לחיים מוצלחים ומאושרים.

תודות

ברצוני להודות לנועה שגב על עריכת הריאיון שהיווה את הבסיס למאמר זה, ועל הכתיבה המשותפת של המאמר, ולזהבה כהן עבור האיורים.

מקורות

1. O'Keefe, J. 1976. Place units in the hippocampus of the freely moving rat. *Exp. Neurol.* 51:78–109.
2. O'Keefe, J., and Dostrovsky, J. 1971. The hippocampus as a spatial map: preliminary evidence from unit activity in the freely-moving rat. *Brain Res.* 34:171–5. doi: 10.1016/0006-8993(71)90358-1
3. Maguire, E. A., Gadian, D. G., Johnsrude, I. S., and Frith, C. D. 2000. Navigation-related structural change in the hippocampi of taxi drivers. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 97:4398–403. doi: 10.1073/pnas.070039597

4. O'Keefe, J., and Nadel, L. 1979. Précis of O'Keefe & Nadel's. The hippocampus as a cognitive map. *Behav. Brain Sci.* 2:487–94.

פורסם אונליין: 19 בספטמבר 2024

נערך על ידי: Idan Segev

מנחים מדעיים: ch zheng | Alessandro Francesco Ulivi

ציטוט: O'Keefe J (2024) תְּאֵי מִיקוּם: תְּאֵי הַמוֹחַ שֶׁעוֹזְרִים לָנוּ לִמְצוֹא אֶת דְּרָכֵנוּ בְּעוֹלָם. *Front. Young Minds.* doi: 10.3389/frym.2023.1022498-he

תורגם והותאם מ: O'Keefe J (2023) Place Cells: The Brain Cells That Help us Navigate the World. *Front. Young Minds* 11:1022498. doi: 10.3389/frym.2023.1022498

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

זכויות יוצרים © 2023 © 2024 O'Keefe. זהו מאמר בגישה פתוחה שמופץ תחת תנאי רישיון [Creative Commons Attribution License \(CC BY\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/). 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

GEORG, גיל: 12

שמי הוא ג'ורג' ואני אוהב לבלות עם חברים, לרכוב על האופניים שלי, ולעסוק בספורט בפרט בכדורסל. אני גם אוהב את התחומים של מדעי הטבע וטכנולוגיה. מעניין אותי להבין איך דברים בנויים ולתקן דברים שנשברים בטעות. זה נוח לאור העובדה שבילדותי הייתי עסוק מאוד בשבירת דברים שהיו בסביבתי, אז עכשיו אני יכול להעסיק את עצמי בתיקונים! אני מקווה שתיהנו מהמאמר הזה כמו שאני נהיית ממנו!

SUYANG, גיל: 15

שלום, אני תלמיד כיתה י'. השתתפתי בתחרויות במדע ובדיבור מול קהל. אני מאוד אוהב לשחות, ושוחה מזה 10 שנים! אני גם אוהב לקרוא ספרים (בעיקר ספרי מדע וביוגרפיות), והדמות ההיסטורית האהובה עליי היא המשורר הסיני סו-שי (סו דונג-פו). אני מתעניין בקריירה עתידית בהנדסה, רפואה, או בינה מלאכותית. אני נהנה מאוד לסקור מאמרים עבור פרונטירז – מדע לצעירים.

הכותבים

JOHN O'KEEFE

פרופסור ג'ון אוקיף הוא חוקר מוח בריטי-אמריקאי. יש לו תואר ראשון בפסיכולוגיה ופילוסופיה מאוניברסיטת סיטי קולג' של ניו יורק, ארצות הברית (City College of New York). בשנים אלו הוא



למד גם קולנוע, ספרות אנגלית מתקדמת ופיזיקה, וגם הכיר את אשתו איילין (Eileen). בתקופה זו הוא התנסה במחקר מוח ניסיוני, ונשבה בקסם של העשייה המדעית. כדי לפרנס את עצמו, הוא עבד בספרייה בהצגת סרטים אירופאים קלאסיים בקורסים שונים, ובשעות הערב הוא היה נהג מונית. פרופ' אוקיף המשיך ללימודי תואר שני ושלישי בפסיכולוגיה באוניברסיטת מקגיל שבמונטריאול, קנדה (McGill University in Montreal), שנחשבה אז למקום "לעלייה לרגל" ללימודי פסיכולוגיה פיזיולוגית. ב-1967 פרופ' אוקיף, בהיותו עמית מחקר פוסט-דוקטורנט, הצטרף ליוניברסיטי קולג' לונדון שבלונדון, אנגליה (University College London) והוא עובד שם עד היום, בתפקיד של פרופסור למדעי המוח הקוגניטיביים. במרוצת שנותיו ביוניברסיטי קולג' לונדון, פרופ' אוקיף חקר את ההיפוקמפוס באמצעות טכניקות מתקדמות של רישום מוח, שניטרו את הפעילות החשמלית של תאי עצב בודדים במוחן של חולדות. מחקר זה הוביל את פרופ' אוקיף לגילוי תאי המיקום, המהווים חלק חשוב ממערכת הניווט במוח. על תגלית זו הוענק לפרופ' אוקיף פרס נובל בתחום של פיזיולוגיה או רפואה בשנת 2014. פרופ' אוקיף זכה בפרסים יוקרתיים רבים נוספים, ביניהם בשנת 2013 בפרס לואיזה גרוס הורביץ (Louisa Gross Horwitz) ופרס קבלי (Kavli) למדעי המוח (2014). הוא עמית בחברה המלכותית באנגליה (The Royal Society). בשנת 2016 הוא נבחר להיות חבר באקדמיה הלאומית למדעים בארצות הברית (The National Academy of Sciences), ובשנת 2019 הוא מונה להיות חבר כבוד באקדמיה המלכותית האירית (Royal Irish Academy). *j.okeefe@ucl.ac.uk

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



קרן פשפחת

שעשוע

Shashua Family Foundation



מהפכת הרזולוציה – רואים את מולקולות החיים בעזרת מיקרוסקופ האלקטרונים הקריוגני

Noa Segev^{1*} | Richard Henderson^{2*}

¹פרונטירז – מדע לצעירים, לוזאן, שווייץ
²המעבדה לביולוגיה מולקולרית של המועצה למחקר רפואי, אוניברסיטת קיימברידג', קיימברידג', אנגליה

תקציר מאמר זה מבוסס על ריאיון שנערך בין שני הכותבים.

ביולוגיה מבנית היא תחום שמטרתו לגלות את המבנה של כל הרכיבים שמהם מורכבים החיים – החל מהמולקולות הקיימות בבני אדם ובחיות אחרות, דרך מולקולות הנמצאות במיקרואורגניזמים זעירים, ועד למולקולות המרכיבות את הצמחים. כדי להבין את המבנים הללו, מדענים העוסקים בביולוגיה מבנית משתמשים בטכניקות הדמיה מתוחכמות המחדדות מאוד את ה"ראייה", שהיא היכולת לקבוע את המבנה של מולקולות קטנות ומגוונות. מיקרוסקופ אלקטרונים הוא אחד מטכניקות ההדמיה המתקדמות והעוצמתיות ביותר. בטכניקה זו האלקטרונים נשלחים דרך דגימות קפואות כדי לקבוע את מבנה המולקולות הבודדות. ההגדלה היא כה עוצמתית, שאפשר לראות את האטומים המרכיבים את המולקולות. התמונות הללו עוזרות לנו להבין את המבנה ואת התפקוד של אבני הבניין היסודיות של החיים. במאמר זה נספר לכם על אודות הפיתוחים שהובילו למהפכת הרזולוציה של מיקרוסקופ האלקטרונים. בזכות תרומתו של

סוקרים צעירים

HOLLY

גיל: 15



Y7 LAURUS
INTERNATIONAL
SCHOOL OF
SCIENCE

גיל: 11–12



ד"ר הַנְּדֶרְסוֹן לתהליך, הוא נבחר לקבל עם מדענים אחרים את פרס הנובל לכימיה לשנת 2017.

ד"ר ריצ'רד הַנְּדֶרְסוֹן (Richard Henderson) זכה בפרס נובל לכימיה לשנת 2017 עם פרופ' ז'אק דובוֹשֶׁה (Jacques Dubochet) ופרופ' יואַכִים פְּרָאנְק (Joachim Frank), על פיתוח מיקרוסקופ קריו-אלקטרוני לקביעת מבנים של מולקולות ביולוגיות בתמיסה.

ביולוגיה מבנית (Structural Biology)

תחום בביולוגיה שעוסק באפיון המבנים של הרכיבים שמהם מורכבים החיים.

חלבון (Protein)

מכונה ביולוגית זעירה המבצעת תפקידים חיוניים רבים בגוף.

אֵנְזִים (Enzyme)

מולקולה ביולוגית המאיצה את התגובות הכימיות בגוף.

איור 1

פרשנות אומנותית של

פְּנִים התא. תוכלו לחשוב על שפנים כמגרש משחקים המכיל מגוון רחב של מולקולות ושל אָבְרוֹנִים בצפיפות – ולכל אחד מהם תפקיד מיוחד. כדי להבין כיצד החיים פועלים, אנחנו שואפים להכיר הן את המבנים הן את התפקודים של כל אחת מאבני הבניין הביולוגיות.

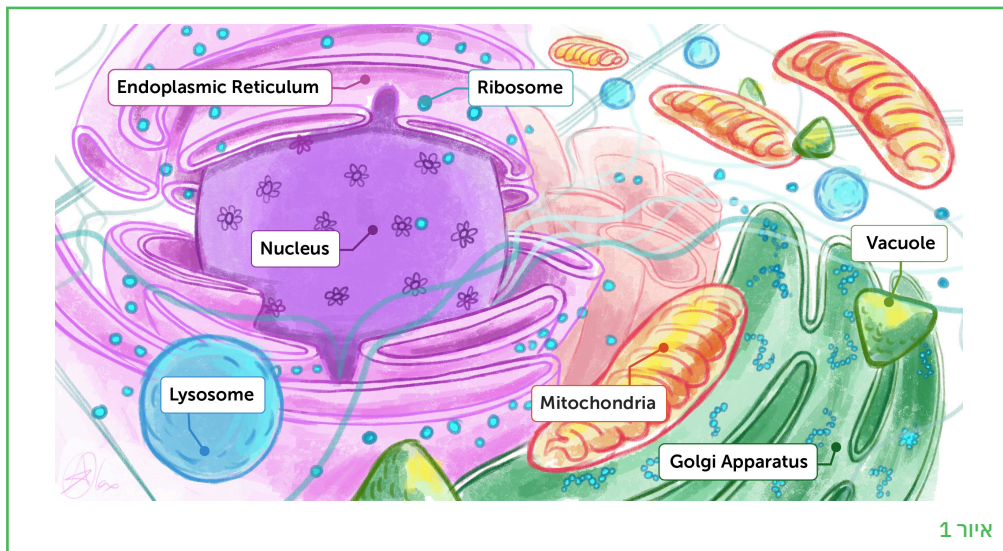
= Endoplasmic Reticulum
 רֶשֶׁתִית פְּלָזְמָת הַתָּא
 = Nucleus
 גרעין התא
 = Lysosome
 ליזוזום
 = Ribosome
 ריבוזום
 = Mitochondria
 מיטוכונדריון
 = Golgi Apparatus
 מערכת גולג'י
 = Vacuole
 וַקּוּלִית.

מידע גנטי (DNA) (Genetic Information)

מידע שעובר מהורים לצאצאיהם, המכתיב את מאפייניו ואת התנהגותו של האורגניזם.

מבט עומק: מְגַלִים את מבנה המולקולות הביולוגיות

גופים חיים מכילים מְבָנִים רבים, ומתרחשים בהם תהליכים חשובים. אנחנו יודעים שבגוף האדם ישנם איברים העשויים מְתָאִים, ושבתוך התאים הללו יש אָבְרוֹנִים ומולקולות רבים, הממלאים את כל התפקודים הנחוצים לשמירה על החיים, כמו ייצור אנרגיה, סילוק פסולת, תנועה, והגנה מפני גורמים מזיקים (איור 1). כדי להבין כיצד פועלים יצורים חיים, בתקווה לשפר את חייהם, עלינו לדעת אֵיךְ מְבָנִים קיימים במערכת ביולוגית נתונה, ומהן הפעילויות שמְבָנִים אלה מְבַצְעִים. הביולוגיה המְבָנִית היא תחום שמטרתו להתבונן במְבָנִים של רכיבים ביולוגיים. בעֶבֶר המדענים חיפשו תחילה פעילויות מסוימות, שהם ידעו שמתרחשות במערכת ביולוגית, כמו המרת מקור אנרגיה אחד לסוג אחר של אנרגיה שאפשר לאחסן. לאחר שמצאו את הפעילות, הם זיהו את המולקולות שהשתתפו בפעילות – בדרך כלל היו אלה חלבונים ואֵנְזִימִים – ורק אז קבעו את המְבָנִים של אותן המולקולות.



איור 1

בשנת 2000 התרחשה בעולם מהפכה בהבנת המידע הגנטי (DNA) – המידע המאוחסן בתאים שלנו שאנחנו יורשים מהורינו. מדענים הרכיבו את "מִקְבֵּץ ההוראות" המלא הראשון (הנקרא רֶצֶף בסיסי של כל המידע הגנטי האנושי. מאז, בְּמִקּוֹם לחפש פעילות, ואחר כך למצוא מולקולה, ואז לקבוע את המבנה שלה, ביולוגים מבניים יכולים להשתמש במידע הגנטי שמְסַפֵּר על כל האנזימים והחלבונים בגוף. בשנת 2000, כאשר הגֶנוֹם האנושי נקבע, גילינו רק כ-20% מהמולקולות המקודדות האנושי! עם התגלית הזאת נפתח

נתיב חדש לגמרי בתחום הביולוגיה המבנית. כעת אנחנו יכולים לגלות את מבנה המולקולות מבלי שנצטרך קודם לדעת מה תפקידן. איך אנחנו חוקרים את המבנים של המולקולות הללו? בעזרתם של חלקיקים זעירים הנקראים אלקטרונים!

אלקטרונים והמיקרוסקופ האלקטרוני

אלקטרונים הם חלקיקים זעירים הנמצאים בכל אטום בעלי מטען חשמלי. האלקטרונים הם מקור של אור ושל צורות אחרות של קרינה אלקטרומגנטית, כמו קרני רנטגן, ותנועתם יוצרת חשמל. האם אתם מאמינים שעד שנת 1895 אף אחד לא ידע על קיומם של האלקטרונים? באותה השנה האלקטרונים זוהו לראשונה על ידי ג'וזף ג'ון תומסון (Joseph John Thompson), מדען במחלקה לפיזיקה באוניברסיטת קיימברידג' שבאנגליה. ארבעים שנה לאחר מכן, ב-1935, ג'ורג' פג'ט תומסון (George Paget Thompson, בנו של ג'וזף ג'ון תומסון) הראה שהאלקטרונים מתנהגים הן כחלקיקים והן כגלים – יש להם תדירות ואורך גל, בדיוק כמו גלים אחרים. גם ג'וזף ג'ון תומסון וגם בנו ג'ורג' פג'ט תומסון זכו בפרסי נובל על שגילו שהאלקטרון מתנהג כחלקיק ועל שגילו שהאלקטרון מתנהג כגל.

תדר

(Frequency)

מספר הפעמים שגל חוזר על עצמו בשנייה אחת.

אורך גל

(Wavelength)

המרחק שלאורכו צורת הגל חוזרת על עצמה.

מיקרוסקופ אלקטרוני (Electron Microscopy)

טכניקה שמשתמשת באלקטרונים לדימות של מבנים קטנים, ובכלל זה, של מולקולות ביולוגיות.

זמן קצר לאחר מכן, מדענים הבינו שאם האלקטרונים מתנהגים כמו גלים, במובן מסוים הם חייבים להתנהג כמו אור, משום שגם אור יכול להתנהג כמו גל. לכן מדענים ניסו להשתמש באלקטרונים כדי להאיר דגימות זעירות. הרעיון זכה לדרך שבה אנחנו משתמשים בעיניים, במצלמה או במיקרוסקופ רגיל כדי להסתכל על דברים – אך במקום להיעזר באור נראה, עושים זאת באמצעות אלקטרונים. זו הייתה ראשית דרכו של מיקרוסקופ האלקטרונים, שהוא טכניקת הדמיה עוצמתית ביותר. לאלקטרונים יש אורך גל קצר פי 100,000 בערך מאורך הגל של האור. אפשר לחשוב על אורך הגל כפרמטר "התמקדות" – ככל שאורך הגל קטן יותר, כך נוכל "להתקרב" יותר לדגימה שלנו. כלומר התמונות שצולמו בעזרת אלקטרונים הן מפורטות מאוד, או במילים אחרות, הן ברזולוציה גבוהה. הודות לרזולוציה הגבוהה שלו, מיקרוסקופ האלקטרונים מסייע בגילוי מבנים של מולקולות זעירות באופן שלא היה אפשרי לראות קודם לכן.

כיצד פועל מיקרוסקופ האלקטרוני?

במיקרוסקופ אלקטרוני קרן אנרגיה של אלקטרונים יוצאת ממקור אלקטרוני ועוברת דרך הדגימה הנחקרת (איור 2A). כאשר אלקטרונים עוברים דרך הדגימה, הם מקיימים אינטראקציה עם האטומים שלה ועוברים תהליך של דיפרקציה, כלומר אותם האלקטרונים נזרקים או סוטים ממסלולם. כשהאטומים נקרים בדרכם של האלקטרונים, האלקטרונים מסתדרים בצורה ייחודית בהתאם למבנה האטומים שהם עוברים דרכו. אחרי שהאלקטרונים עוברים דיפרקציה, עדשות הנמצאות במיקרוסקופ (הדומות לעדשות של מצלמה) אוספות וממקדות את האלקטרונים. לאחר מכן, הם מתועדים על ידי גלאי אלקטרונים. בשלב זה למדענים יש תמונה של האלקטרונים שעברו דיפרקציה מהדגימה, ועליהם להמיר אותה לתמונה של הדגימה עצמה. המרה זו מבוססת על פיזיקה פשוטה המתארת את הקשר בין מה שאנחנו מודדים לבין התמונה שאנחנו מקבלים. ההמרה תלויה

דיפרקציה

(Diffraction)

הדרך שבה חפץ גורם לפיזור של גל; לדוגמה, דגימה שגורמת לפיזור של אלקטרונים.

בגורמים רבים, ביניהם אורך הגל של האלקטרונים והעדשות שבהן משתמשים, מומחים למיקרוסקופיה מוודאים את ההמרה.

איור 2

מיקרוסקופ אלקטרונים (A)

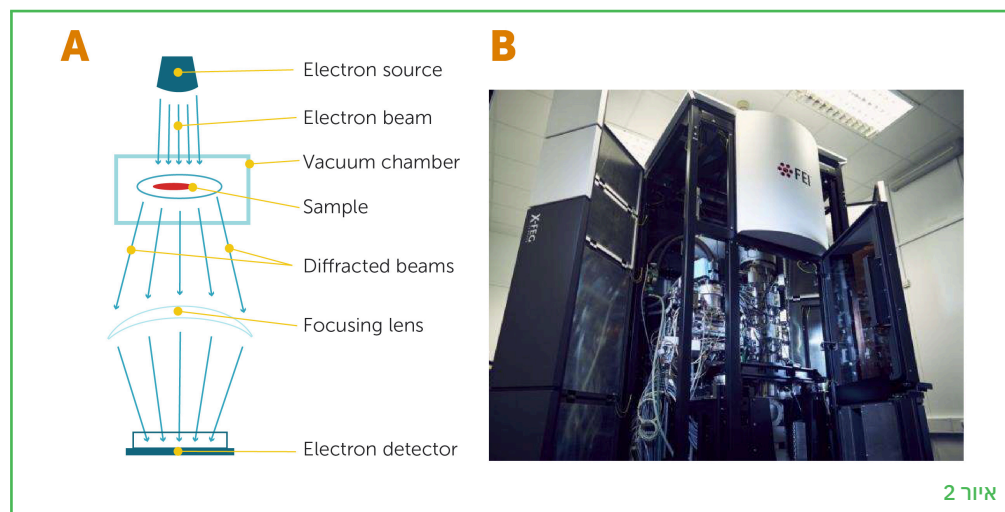
במיקרוסקופ האלקטרונים מקור האלקטרונים משחרר קרן של אלקטרונים חמים וטעונים באנרגיה. הקרן הזאת עוברת דרך דגימה שנמצאת בתוך תא ריק (ואקום). כאשר האלקטרונים מקיימים אינטראקציה עם הדגימה, הם עוברים דיפרקציה (מתפזרים). אז, עדשות מיוחדות אוספות וממקדות אותם, ולאחר מכן גלאי

האלקטרונים קולט אותם. (B)

מיקרוסקופ אלקטרוני מאוניברסיטת קיימברידג' (אנגליה) המאפשר למדענים לצלם דגימות ביולוגיות קפואות (איור):

<https://www.cambridgeindependent.co.uk/business/astrazeneca-and-lmb-in-cambridge-use-one-of-world-s-most-advanced-microscopes-to-make-break-through-9052845/>.
אוניברסיטת קיימברידג'.

- = Electron source
- מקור אלקטרונים
- = Electron beam
- קרן אלקטרונים
- = Vacuum chamber
- תא ריק
- = Sample
- דגימה
- = Diffracted beams
- קרניים מפוזרות
- = Focusing lens
- עדשת מיקוד
- = Electron detector
- גלאי אלקטרונים.



איור 2

אתגרי השימוש במיקרוסקופ אלקטרונים

אף על פי שהאלקטרונים יכולים לעזור לנו לראות תמונות יוצאות דופן של מולקולות, עלינו להתגבר על אתגרים משמעותיים כשמשתמשים בהם להדמיה של מולקולות ביולוגיות. ראשית, לפי פיזיקת הקוונטים, אלקטרונים בודדים אינם "הגיוניים". כאשר שואלים אותם שאלה (לדוגמה, מה קורה כשהם פוגשים מולקולה ספציפית?), הם לא משיבים תשובה ברורה כפי שאנשים עושים. במקום זאת, יש *התקנות* (הסתברות) מסוימת של התנהגות האלקטרונים בכל אחת מהתוצאות השונות. בעולם האלקטרונים כל מה שיכול היה לקרות *אכן קרה*, עם הסתברות מסוימת לכל אפשרות. המשמעות היא שהמדענים חייבים לאסוף תשובות רבות מאלקטרונים רבים, ולשלב את המידע בתבונה כדי לקבל את התשובה הכוללת. כדי לעשות זאת, אנחנו מאירים את הדגימה במיליוני אלקטרונים ובעזרת חישוב *הממוצע* הכולל של תכונותיהם, אנחנו מקבלים תשובה הגיונית.

שנית, האלקטרונים עלולים לפגוע בדגימה, כיוון שיש בהם אנרגיה גבוהה מאוד והם חייבים לעבור דרך כל הדגימה כדי להגיע לגלאי. הטמפרטורה שלהם יכולה להגיע לכאלפיים מיליון מעלות צלזיוס; לשם השוואה: מים רותחים ב-100 מעלות צלזיוס! האלקטרונים הללו, שהם אנרגטיים מאוד, כמו גם כל סוג אחר של קרינה אנרגטית, יכולים "למשוך" אלקטרונים מתוך מולקולות הדגימה. תהליך זה *משנה* את הצורות ואת המאפיינים של מולקולות הדגימה, משום שהמולקולות הביולוגיות עדינות יחסית. מסיבה זו, קשה למדענים לקבל מספיק מידע על המבנה של מולקולה ביולוגית בודדת לפני שהיא מושמדת. אחת הדרכים להתמודד עם האתגר הזה היא לבצע הדמיה של הרבה מולקולות *זהות ובודדות* – לפחות 500 כשרוצים להתבונן במולקולות ביולוגיות במיקרוסקופ אלקטרונים – וליצור ממוצע של התמונות כדי לקבוע את המבנה של מולקולה טיפוסית. דרך נוספת להתמודדות עם האתגר הזה היא לקרר את הדגימה בצורה מיוחדת שתגביר את עמידותה בפני נזקי אלקטרונים. נתאר זאת בחלק הבא.

אתגר נוסף נובע מהעובדה שהאלקטרוניק מתפזרים ברגע שהם נמצאים ליד אטומים כלשהם. לכן חייב להיות מסלול פנוי לחלוטין בין מקור האלקטרוני לבין הדגימה, כדי שהאלקטרוני יגיעו למולקולות הרצויות, ולא יתפזרו בגלל מולקולות אחרות שנמצאות בדרךכם, אפילו מולקולות של חמצן וחנקן הנמצאות באוויר. במילים אחרות, המדענים חייבים ליצור ריק סביב הדגימה שבמיקרוסקופ האלקטרוני. כיוון שמולקולות ביולוגיות נמצאות תמיד בתמיסות המכילות מים (למשל, מולקולות בדם שלכם), הבעיה היא שהמים מתאדים בריק והדגימה מתייבשת. לעיתים קרובות ההתייבשות הזאת פוגעת במולקולות הביולוגיות שבדגימה. כדי להתגבר על אתגר זה, מדעני הביולוגיה המבנית נאלצו לרתום את היצירתיות שלהם במטרה לנצל את התכונות הייחודיות של המים.

האם מים יכולים להישאר במצב צבירה נוזלי כשקר מאוד?

הנה ניסוי חביב שתוכלו לעשות בבית כדי להבין את אחת התכונות הייחודיות של המים (איור 3). קחו צנצנת ריקה עם מכסה ומלאו אותה במים. הבריגו את המכסה בחוזקה כדי לוודא שלא ייכנסו לתוכה בועות אוויר, והכניסו את הצנצנת למקפיא. השאירו את הצנצנת במקפיא למשך יום שלם – עד אז טמפרטורת המים תרד לטמפרטורה של 10°C או 20°C (מים בדרך כלל הופכים לקרח ב 0 מעלות צלזיוס). למוחרת הוציאו את הצנצנת מהמקפיא ובדקו: האם המים הפכו לקרח מוצק, או שהם נשארו במצב צבירה נוזלי?

איור 3

קירור-על של מים בבית. קחו צנצנת ריקה, מלאו אותה לגמרי במים, ונדאו שאין בתוכה בועות אוויר. אטמו את הצנצנת לגמרי. שימו אותה במקפיא למשך יום שלם. לאחר מכן הוציאו את הצנצנת. האם המים קפואים, או שהם עדיין נוזליים? אם הם עדיין נוזליים, יצרתם מים בקירור-על!



איור 3

ברוב המקרים תגלו שהמים עדיין נוזליים – הם עברו קירור-על, כלומר הם התקררו לטמפרטורה נמוכה מטמפרטורת הקיפאון (0°C) אך מבלי להפוך לקרח. בניסויים שלנו אנחנו רוצים לקרר מים עוד יותר, עד מתחת לטמפרטורה של 170°C -, משום שבטמפרטורה זו הם נעשים יציבים מאוד וללא תזוזה. כמו כן, אנחנו רוצים להימנע מהיווצרות של גבישי קרח, כי הם מפריעים למדידות שלנו. כדי להצליח בכך, עלינו להשתמש בשיטת קירור מיוחדת שפותחה במעבדתו של ז'אק דובוֹשֶׁה (Jacques Dubochet), שחָלַק את פרס הנובל לכימיה לשנת 2017 עם יואַכִּים פְּרָאנְק (Joachim Frank) ועימי - ריצ'רד הַנְּדֵרְסוֹן. בשיטה זו אנחנו משתמשים באַתָּאן או בְּפֶרוֹפָאן נוזליים (אלה חומרים המצויים בגז טבעי, עשויים מפחמן ומימן), המקוררים לטמפרטורה של 185°C -. לאחר מכן, אנחנו טובלים שְׁכָבֶת מים דקה מאוד בנוזל המקורר של האַתָּאן או הפְּרוֹפָאן. המים מתקררים כה מהר – בערך תוך אלפית השנייה – כך שגבישי קרח מאורגנים לא מספיקים להיווצר, והם

נשאים בצורתם הנוזלית הלא-מאורגנת [1]. אנחנו קוראים לסוג הקרח הזה "קרח אמורפי" (חסר צורה) [1], וכך אנחנו מקבלים מים בקירור-על.

קירור-על (Supercooled)

קירור מתחת לטמפרטורת הקיפאון תוך שמירה על מצב צבירה נוזלי וללא היווצרות גבישים.

מיקרוסקופ אלקטרוני בטמפרטורות נמוכות (Electron Cryomicroscopy)

נקרא גם "מיקרוסקופ אלקטרוני קריוגני". טכניקה שבה משתמשים באלקטרונים לצורך דימות של מולקולות ביולוגיות הנמצאות במים, תוך קירורן במהירות לטמפרטורות נמוכות.

איור 4

תמונות שהתקבלו ממיקרוסקופ

(A) האלקטרוני הקריוגני. מבנה של נגיף מחולל מחלה בשם נגיף אדנו (Adenovirus). התמונה מראה את המעטפת החיצונית הנקראת קפסיד (קופסית הנגיף), שהיא חלבון העוטף את החומר הגנטי של הנגיף. הצבעים מייצגים את המרחק ממרכז הכדור: מהמרכז מסומנים באדום, והחלקים הקרובים ביותר למרכז מסומנים בכחול. (האיור נלקח מ-[2]).

(B) אנזים המשתתף בייצור אנרגיה במיקרובים. הצבעים מייצגים את תתי-היחידות (החתיכות) הבודדות של האנזים. (האיור נלקח מ-[3]).

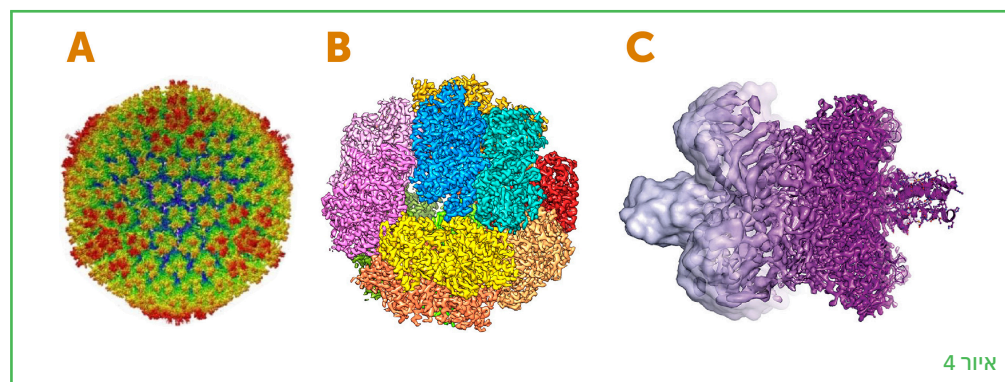
(C) דוגמה לשיפור הרזולוציה של מיקרוסקופ האלקטרוני הקריוגני בין 2013 (משמאל, בצבע סגול בהיר) לבין 2017 (מימין, בצבע סגול כהה). (איור: Martin Högbom, Stockholm University, מבוסס על איור מאת V. Falconieri).

נוסחת הקפס של אלקטרוני חמים ודיגימות קרות

מתברר ששכבות מים דקות שעברו קירור-על תומכות בצורה טובה להפליא במולקולות הביולוגיות שאנחנו רוצים לדמות באמצעות מיקרוסקופ האלקטרוני. כאשר לתהליך ההדמיה מתווסף גם שלב הקירור, הטכניקה נקראת **מיקרוסקופ אלקטרוני בטמפרטורות נמוכות** (בלועזית: מיקרוסקופ אלקטרוני קריוגני). "קריוגני" הוא המונח המתייחס לקירור. טכניקה זו מאפשרת לנו להתמודד עם שני האתגרים שהזכרנו לעיל: היא מאפשרת לייצב את הדגימה, שהופכת עמידה בפני נזקים הנגרמים מאלקטרוני עתירי אנרגיה. כמו כן, הטכניקה מאפשרת לנו לבחון את המולקולות הביולוגיות בסביבתן המימית הטבעית, ללא אידוי של מים, כיוון שהמים נמצאים בסביבה של ריק. ישנו יתרון חשוב נוסף: בניגוד לרוב הנוזלים האחרים, המים מתפשטים כשהם מגיעים לטמפרטורה של מתחת ל-4°C. תכונה זו של המים מונעת פגיעה במולקולות הביולוגיות כשהן נמצאות במים שעברו קירור-על. אם המים היו מתכווצים בקירור, המולקולות היו נלחצות ואולי אף נשברות.

שיטת ההדמיה של מיקרוסקופ האלקטרוני הקריוגני פשוטה למדי, אך יעילה ביותר. היא מאפשרת לנו לדמות מולקולות ביולוגיות ברזולוציה שלא הייתה אפשרית בעבר, ולכן יש המכנים אותה "מהפכת הרזולוציה".

באיור 4 נוכל לראות דוגמאות לתמונות יפות שהתקבלו בשימוש במיקרוסקופ האלקטרוני הקריוגני. מדובר בקנה מידה זעיר – עשיריות של ננומטרים, שהם פחות מאלפית של רוחב של שיערה אנושית! האם גם אתם מבינים את הפלא הגדול שנקרא "מיקרוסקופ האלקטרוני הקריוגני"?



מה צופן העתיד למיקרוסקופ האלקטרוני הקריוגני?

האלקטרוני הם החלקיקים שיכולים לסייע לנו לדמות מולקולות ביולוגיות זעירות בצורה הטובה ביותר. כדי שנוכל להבין עד כמה הם יעילים, הבה נשווה אותם לשני חלקיקים אחרים שנהוג להשתמש בהם לאותה המטרה: פוטונים של קרני רנטגן (הדומים לחלקיקי האור, אך בעלי אורכי-גל קצרים), וניוטונים (חלקיקים הנמצאים בגרעין האטום). כאשר אנחנו

מחשבים את כמות המידע שאנחנו מקבלים משימוש בחלקיק מסוים לעומת הנזק שאותו חלקיק מסב לדגימה, נוכל להעריך את מידת ההתאמה של החלקיק למטרת ההדמיה. בהשוואה זאת גילינו שהיעילות של אלקטרונים היא פי 1,000 לעומת קרני הרנטגן, והם טובים פי שלושה מהניטרונים! לכן עמיתיי ואני התחלנו להשתמש באלקטרונים במקום בחלקיקים אחרים. כיום מיקרוסקופ האלקטרונים הקריוגני מצליח מאוד, ומדענים רבים בתחום הביולוגיה המבנית משתמשים בו.

עם זאת, עלינו לערוך עוד שיפורים משמעותיים במיקרוסקופ האלקטרונים הקריוגני. אחד מהם הוא שיפור גלאי האלקטרונים, שעדיין אינם מספיק גדולים או יעילים, ודורשים מאיתנו להשתמש במספר גבוה של אלקטרונים יותר ממה שנדרש באופן תיאורטי. בנוסף, נוכל להתייעל אם נגביל עוד יותר את תנועת הדגימה (הן של מולקולות המים הן של המולקולות הביולוגיות) במפגש בינה לבין קרן האלקטרונים [4, 5]. אנחנו מאמינים שתוך כ-5 שנים נוכל להתקדם משמעותית לעבר פתרון האתגרים הללו. משנעשה זאת, יהיה ברשותנו כלי חזק עוד יותר מהקיים כיום, שבצורתו נוכל לענות בדיוק רב יותר על שאלות ביולוגיות רבות, כמו איך פועל מנגנון החיים, וכיצד מתרבים יצורים חיים. המידע שאנחנו משיגים יכול לסייע לנו לשמור על בריאותם של אנשים, של בעלי החיים ושל הצמחים. אנחנו צופים למיקרוסקופ האלקטרונים הקריוגני עתיד מזהיר!

המלצות למוחות צעירים

אני, ריצ'רד, רוצה לחלוק עימכם עצה מעשית שליוותה אותי לאורך הקריירה שלי, שאותה ניסח בכתביו פיטר מדאואר (Peter Medawar), שזכה בפרס נובל בתחום של פיזיולוגיה או רפואה בשנת 1960. לאחר שזכה בפרס הנובל, פיטר מדאואר פרסם שני ספרים: "האומנות של מציאת הפתרונות" ו"עצות למדענים צעירים".

בספריו מדאואר אמר שיש הרבה דברים מעניינים במדע ובחיים. הוא טען שעלינו להתעניין בכל דבר, אך שצריך לבחור משהו שאנחנו מתעניינים בו במיוחד ולהתמחות בו. יתרה מכך, הוא אמר שמדענים צריכים לעסוק בתחום שיצליח לייצר ידע חדש בקרוב ולא בעוד 100 שנים, כי זה כבר יהיה מעבר לזמן חייהם. לדעתו המדע הוא אומנות הדברים הפתורים, כלומר סוגיות שאפשר לפתור, ועל המדענים לערוך ניסויים שעובדים עכשיו, ולהיעזר בטכניקות עדכניות.

כשהייתי סטודנט צעיר לפיזיקה, תהיתי באיזה כיוון הפיזיקה מתפתחת. אני זוכר שהכנתי רשימה של כל נושאי העתיד המעניינים. הרשימה כללה מחקר בנושא היתוך, הכולל הפקת כוח בלתי מוגבל מהיתוך מימן. היא כללה גם פיזיקת חלקיקים באנרגיה גבוהה, שהובילה לגילוי של חלקיקים חדשים, למשל בוזון היגס (Higgs boson) וחלקיקים אחרים. ברשימה שלי הופיעה גם הפיזיקה של המצב המוצק, שקידמה את תעשיית המחשבים ואת פיתוח המיקרו-שבבים שמזינים מחשבים. הנושאים המעניינים אותי כללו, בין השאר, גם ביו-פיזיקה, אסטרופיזיקה, קוסמולוגיה, חורים שחורים וכוכבי נייטרונים (איור 5). כל נושא שהייתי בוחר מבין כולם, היה מעניין ומלהיב באותה המידה. לכן, אם תחליטו לבחור בקריירה מדעית, עליכם לבחור במשהו שמעניין אתכם, כדי שתהיה לכם מוטיבציה להמשיך במחקר ובעבודה מבלי שאף אחד יכריח אתכם לעשות זאת. כשאנחנו מתעניינים במשהו ועוסקים בו

מתוך רצון פנימי, הקשיים שאנחנו נתקלים בהם בדרך לא יעצרו אתכם מלהתקדם – אפשר לראות אותם כאתגרים, ולהמשיך הלאה. משבחרתם נושא מעניין, ולפני שאתם ממשיכים לצעוד בשביל הזה, עדיף לברר כמה שיותר על הפעולות השונות שבהן תוכלו לנקוט כדי לחקור את הנושא. אם לאחר חצי שנה או שנה של עבודה מאומצת תגלו שהרעיון שלכם לא היה כל כך מוצלח, אל תהססו לשקול שוב ו"לחשב מסלול מחדש".

איור 5

כיצד בוחרים תחום מדעי?

כשהייתי סטודנט לפיזיקה התעניינתי בנושאים רבים שהיו פרוסים בפניי. במבט לאחור, אני מבין שכולם היו ודאי מעניינים אותי באותה המידה. כשאתם בוחרים תחום, נדאו כי אתם בוחרים בתחום שמעניין אתכם ושיספק לכם מוטיבציה לאורך זמן.



איור 5

כיום המדע מתקדם במהירות רבה בהשוואה למה שהיה בעבר. לפני מאה שנה אפילו לא ידענו על קיומם של קרני רנטגן ואלקטרונים, ועכשיו יש ברשותנו מידע על כל הגנום האנושי, שיטות מתוחכמות לעבודה עם DNA ויכולת להבין כמעט כל מבנה שנרצה. מאה השנים הבאות יהיו תקופה טובה מאוד לחיות בה, וכדאי לכם להיות מדענים! תיהנו מחייכם, והשקיעו בתחומים שהכי מעניינים אתכם!

תודות

ברצוננו להודות לאלכס ברנשטיין עבור האיורים, ולסוזן דיבד (Susan Debad) על עריכת הלשון של כתב היד באנגלית.

חומרים נוספים

הרצאת הנובל של ריצ'רד הַנְדֶרְסוֹן, שנת 2017. <https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/2017/henderson/lecture/>

מיקרוסקופ האלקטרונים הקרינני - ריצ'רד הַנְדֶרְסוֹן ב-"Science Serious".

<https://www.youtube.com/watch?v=L6U-sYUF9s&t=262s>

מסבירים: מהו מיקרוסקופ האלקטרונים הקרינני? (Chemistry World).

<https://www.chemistryworld.com/news/explainer-what-is-cryo-electron-microscopy/3008091.article>

מקורות

1. Dubochet, J., Lepault, J., Freeman, R., Berriman, J. A., and Homo, J.-C. 1982. Electron microscopy of frozen water and aqueous solutions. *J. Microscopy* 128:219–37. doi: 10.1111/j.1365-2818.1982.tb04625.x
2. Liu, H., Jin, L., Koh, S. B. S., Atanasov, I., Schein, S., Wu, L., et al. 2010. Atomic structure of human adenovirus by cryo-EM reveals interactions among protein networks. *Science* 329:1038–43. doi: 10.1126/science.1187433
3. Allegretti, M., Mills, D. J., McMullan, G., Kühlbrandt, W., and Vonck, J. 2014. Atomic model of the F420-reducing [NiFe] hydrogenase by electron cryo-microscopy using a direct electron detector. *Elife* 3:e01963. doi: 10.7554/eLife.01963
4. Vinothkumar, K. R., and Henderson, R. 2016. Single particle electron cryomicroscopy: Trends, issues and future perspective. *Q. Rev. Biophys.* 49:e13. doi: 10.1017/S0033583516000068
5. Henderson, R. 2015. Overview and future of single particle electron cryomicroscopy. *Archiv. Biochem. Biophys.* 581:19–24. doi: 10.1016/j.abb.2015.02.036

פורסם אונליין: 19 בספטמבר 2024

נערך על ידי: Robert T. Knight

מנחים מדעיים: Sophia S. Wang | Fred Junghans

ציטוט: Segev N | Henderson R (2024) מהפכת הרזולוציה – רואים את מולקולות החיים בעזרת מיקרוסקופ האלקטרונים הקריוגני. *Front. Young Minds*. doi: 10.3389/frym.2023.1063909-he

תורגם והותאם מ: Segev N and Henderson R (2023) Resolution Revolution—Seeing the Molecules of Life With Electron Cryomicroscopy. *Front. Young Minds* 11:1063909. doi: 10.3389/frym.2023.1063909

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

זכויות יוצרים © 2023 © Segev I Henderson 2024. זהו מאמר בגישה פתוחה שמופץ תחת תנאי רישיון [Creative Commons Attribution License \(CC BY\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/). 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

HOLLY, גיל: 15

אני רוצה ללמוד ביו-רפואה, ומתעניינת בכל מה שקשור לגוף האדם. אני אוהבת לצפות בתוכניות על פשע שבהן רואים כיצד המדע יכול לסייע בפתרון תעלומות. תמיד הייתי מוקפת באנשים שעוסקים במדע ובמחקר רפואי. מחוץ למסגרת הלימודים, אני מוזיקאית, רקדנית ואומנית.

Y7 LAURUS INTERNATIONAL SCHOOL OF SCIENCE, גיל: 11-12

אנחנו תלמידי כיתה ז' בִּלְאוּרוּס שבטוקיו! אנחנו מתעניינים בכל מה שקשור למדע, ואוהבים גם לשחק פורטנייט ושחמט.

הכותבים

NOA SEGEV

נועה שגב היא כְּתִבֶּת מדעית ומנהלת פרויקטים בפרונטירז – מדע לצעירים. נועה בוגרת תואר ראשון בפיזיקה מהאוניברסיטה העברית בירושלים, וסיימה את התואר השני שלה בהנדסת אנרגיה מתחדשת בטכניון – המכון הטכנולוגי לישראל. מאז 2019 היא מראיינת זכות וזכים בפרסי נובל, וכותבת איתם את המאמרים המתפרסמים באוסף הנובל של פרונטירז – מדע לצעירים. מטרתה של נועה היא להנגיש לכולם את המדע שעומד בבסיס התגליות שהובילו לזכיית פרס נובל, ולסייע לכולות ולחתינים שזכו בפרסי נובל לחלוק עם הכלל תובנות רבות-פְּרָךְ, פרי ניסיונם המקצועי והאישי. *noasegev@gmail.com

RICHARD HENDERSON

ד"ר ריצ'רד הֵנְדֵרְסוֹן הוא ביו־פיזיקאי ובילוג מולקולרי סקוטי, והוא מדען חוקר במעבדת MRC לבילוגיה מולקולרית השייכת לאוניברסיטת קיימברידג' שבאנגליה (Cambridge, England). ד"ר הֵנְדֵרְסוֹן השלים את התואר הראשון שלו בפיזיקה באוניברסיטת אדינבורו שבסקוטלנד (Edinburgh, Scotland) ואת הדוקטורט שלו בבילוגיה מולקולרית באוניברסיטת קיימברידג' (אנגליה), שם הוא חקר את המבנה של אנזים המסייע בתהליך העיכול. לאחר מכן, ד"ר הֵנְדֵרְסוֹן ערך את מחקר הפוסט-דוקטורט שלו באוניברסיטת ייל שבקונטיקט, ארצות הברית (Yale University, Connecticut, United States). ב-1973 ד"ר הֵנְדֵרְסוֹן חזר למעבדת MRC לבילוגיה מולקולרית בקיימברידג', ועד היום הוא מדען חוקר עצמאי בה. במרוצת השנים ד"ר הֵנְדֵרְסוֹן עָמַל כדי לשפר את מיקרוסקופ האלקטרונים, להגביר את הרזולוציה שלו, ולאפשר את השימוש בו להדמיה של דגימות ביולוגיות עדינות. עבודתו הובילה להתקדמות טכנולוגית גדולה, שאפשרה למדענים להרחיב את מגוון ההדמיות של דגימות ביולוגיות, ובכך קידמה את תחום הבילוגיה המולקולרית. על תרומתו זו, ד"ר הֵנְדֵרְסוֹן ושני עמיתים נוספים קיבלו את פרס הנובל בכימיה לשנת 2017. בנוסף לפרס נובל, ד"ר הֵנְדֵרְסוֹן זכה במספר רב של פרסים יוקרתיים אחרים, ובכלל זה פרס רוזנסטיל (Rosenstiel) לעבודה יוצאת דופן במחקר רפואי בסיסי (1991) ובמדליית קופלי (Copley) של החברה המלכותית (2016). *rh15@mrc-lmb.cam.ac.uk

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



קרן משפחת
שעשוע
Shashua
Family Foundation

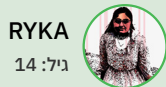


כלכלה: הרבה יותר מְכַסֶּף

Angus Deaton*

המחלקה לכלכלה, בית הספר של פרינסטון לייחסים ציבוריים ובינלאומיים, אוניברסיטת פרינסטון, פרינסטון, ניו ג'רזי, ארצות הברית

סוקרים צעירים



הכלכלה מניעה את העולם כפי שאנחנו מכירים אותו כיום. חיי היום-יום שלנו מושפעים מאוד מהכלכלה, הן ברמה המקומית והן ברמה העולמית. יש החושבים שהכלכלה סובבת בעיקר סביב כסף, אך למעשה הכלכלה קשורה לנושאים מהותיים הנוגעים לחייהם של אנשים, כמו רווחה, שוויון בין אנשים ושוויון בין קבוצות. במאמר זה אציג בקצרה את הדרכים שבהן כלכלנים תופסים את הרווחה האנושית. לאחר מכן אסביר מדוע חשוב שכאשר אנחנו חוקרים את הכלכלה, איננו מתמקדים רק באנשים יחידים או רק בקבוצות של אנשים – עלינו לבחון את שני ההיבטים. לבסוף נדון בעתיד הכלכלה, ואחלוק עימכם כמה עצות ותובנות שלמדתי בשנות הקריירה המדעית שלי.

פרופסור אָגוס דִיטון (Angus Deaton) זכה בפרס נובל לכלכלה לשנת 2015 עבור ניתוחיו בתחומי הצריכה, העוני והרווחה.

מהי כלכלה

הכלכלה היא אחד מעמודי התווך שסביבם עולמנו סובב. היא משפיעה עלינו הן במובן הפרטני הן במובן הקולקטיבי. הכלכלה לא תוכננה על ידי מישהו למטרה מסוימת, אלא זו

תופעה מורכבת ודינמית שנוצרת מפעולות של אנשים המנסים להיטיב עם עצמם. הכלכלה משתנה עם הזמן במהירות רבה למדי, במיוחד ב-30–20 השנים האחרונות. ההתפתחויות הנוכחיות והמתמשכות בטכנולוגיות, בשילוב של הגלובליזציה המתעצמת, משנות באופן מהותי את אופני הפעולה של הכלכלה. כל הגורמים הללו הופכים את הכלכלה לתחום מורכב למחקר (ראו כאן למידע נוסף על כלכלה).

גלובליזציה (Globalization)

השפעתם ההדדית ההולכת וגוברת של בני אדם וקבוצות המרוחקים זה מזה (ואפילו בעבר השני של העולם).

כלכלה (Economics)

אחד ממדעי החברה הבוחן את הרווחה האנושית, ומתמקד בעיקר בייצור, הפצה וצריכה של סחורות ושל שירותים. המדענים בתחום זה מנתחים את השימוש שעושים יחידים, עסקים, ממשלות ומדינות במשאבים שלהם. הכלכלה עוסקת גם בחלוקת משאבים בין אנשים ובעוני.

מיקרו-כלכלה

(Microeconomics)

חקר ההתנהלות הכלכלית של יחידים (כגון צרכנים), קבוצות ותעשיות.

מקרו-כלכלה

(Macroeconomics)

חקר הכלכלה בכללותה, הכולל את ההתנהגות הכללית של מחירים ושל סך הכמויות של מוצרים ושירותים הקיימים.

תפקיד הכלכלנים הוא לחשוף כמה מהעקרונות הבסיסיים המשפיעים על הפעילות הכלכלית (תאווה הבצע האנושית היא אחד מהם!). אנחנו מנסים לזהות יחסי גומלין בין היבטים שונים של הכלכלה, כמו הקשרים בין ההכנסה של אנשים, לבין העלות של מוצרים, לבין סוגי המוצרים הנרכשים וכמותם, לבין הסכום שאנשים חוסכים. במיקרו-כלכלה אנחנו בוחנים את הבחירות הכלכליות האישיות של אנשים. במקביל, אנחנו יכולים לחקור גם את האופן שבו בחירות כלכליות של קבוצות גדולות (כגון מדינות) משפיעות על המצב הכלכלי של הקבוצה כולה. אלו שאלות רחבות שבהן עוסקים בתחום המיקרו-כלכלה.

השאיפה שלנו היא שההבנות שלנו לגבי מיקרו-כלכלה ומקרו-כלכלה יתפתחו באופן רציף לכדי מדיניות ותקנות שימושיות שתורמות לרווחתם של אנשים. למרבה המזל, בעשורים האחרונים הכלכלה היא מדע מבוסס על נתונים, וכעת כלכלנים יכולים לנתח את כמות הנתונים העצומה שהם אספו כדי להסיק מסקנות חדשות לגבי תהליכים כלכליים, שבעבר היה קשה להבין או בלתי אפשרי לחקור.

כפי שתראו לאורך מאמר זה, כלכלה אינה מדברת רק על כסף – היא עוסקת בנושאים בסיסיים של הרווחה האנושית, וגם באי-שוויון ובעוני. נקודת המבט שלנו והפעולות שבהן אנחנו נוקטים בנושאים אלה יכולות להשפיע על רווחתם של יחידים ושל החברה כולה. הקדשתי את הקריירה שלי ללימוד הנושאים הקריטיים הללו, וכעת אני מזמין אתכם למסע שבו אשתף אתכם בכמה מהממצאים החשובים שלי.

כלכלה ורווחה אנושית

יש שהאשימו את הכלכלנים בכך שהם מתעניינים רק בכסף ובעושר של האנשים, אבל הכסף הוא רק חלק מהכלכלה. כלכלנים רבים מתעניינים באושר של בני האדם וברווחתם. אחת הגיבורות שלי היא כלכלנית הודית בשם אמרטייה סן (Amartya Sen) שבוחנת את רווחתם הכלכלית של אנשים מתוך השאלה – מה אנשים מסוגלים לעשות באמצעות הכסף שברשותם, בהתחשב בנסיבות שבהן הם נמצאים? סן מצאה שאיכות החיים ורווחתם של אנשים קשורות למידת היכולת שלהם לעשות את הדברים שהם היו רוצים לעשות, ואלה הדברים שהופכים את חייהם לחיים ששווה לחיות [1]. היכולת הזו מושפעת מתנאי מחייה רבים, כולל גריאות ומקום המגורים. עוני הוא מושג רחב יותר מאשר מחסור בכסף – זהו חוסר היכולת של אנשים בודדים או של קבוצה להשיג את רמת התפקוד שהם שואפים אליה. לכן עוני עוסק, בין היתר, בבריאות, בחינוך, בתעסוקה ובהגנה מפני אלימות.

מה יקרה אם נחשוב על כלכלה מצליחה ככזו שמגבירה את האושר האנושי? ג'רמי בנת'ם (Jeremy Bentham) היה כלכלן בעל השפעה שהאמין בגישה זו. מפני שיש סוגים שונים של אושר, קשה לחוקרים לנתח תשובות לשאלה הפשוטה: "עד כמה אתם

שביעות רצון מהחיים (Life Satisfaction)

הערכה סובייקטיבית של רמת הסיפוק הכללית בחיים של אדם.

מאושרים?". מחקר שערכתי עם פרופ' דניאל פֶּהֶנְמַן, חתן פרס נובל לכלכלה גם הוא, גילה כי **שביעות רצון מהחיים** שונה מתחושת אושר ברגע נתון [2]. לדוגמה, דמיינו שאתם מבלים כעת עם החברים שלכם בקולנוע. אם הייתי שואל אתכם עד כמה אתם שמחים, אולי הייתם אומרים שאתם שמחים מאוד. עם זאת, אם הייתי שואל אתכם עד כמה אתם נִשְׁבְּעֵי רצון מהדרך שבה החיים שלכם מתנהלים, אולי הייתם אומרים שאתם לא כל כך מרוצים, כי אתם מתקשים בבית הספר או שאינכם אוהבים את המקום שבו אתם גרים כעת. האם זה אומר שאתם מאושרים או לא? דוגמה נוספת: אם השקעתם שעות רבות כל השבוע בלימוד לקראת מבחן חשוב, אולי תאמרו שאתם לא כל כך שמחים כרגע. אבל אם המשכתי לשאול אתכם איך החיים שלכם מתנהלים באופן כללי, אולי תגידו שאתם מרוצים מחייכם, ושאתם נהנים מהלימודים ומהחיים החברתיים שלכם.

המחקר שלנו הראה שמעל הכנסה שנתית מסוימת (כ-75,000 דולר אמריקאי בשנת 2010), עלייה בהכנסה אינה מגבירה את תחושת האושר (איור 1). אנחנו מאמינים שהסיבה לכך היא שמעבר להכנסה זו, יכולתם של אנשים לממש את הדברים החשובים ביותר לרווחתם הרגשית – אינה עולה. אולם אנשים מרגישים יותר מרוצים מחייהם ככל שההכנסה שלהם עולה, ומצאנו במחקר שכל הכפלה של הכנסה מביאה לעלייה זקה בשביעות הרצון מהחיים. מסיבות אלו בחקר הכלכלה חשוב להבחין בין סוגי האושר, כדי לִשְׁקֵל את כולם.

איור 1

ההבדל בין אושר רגעי לבין שביעות רצון מהחיים.

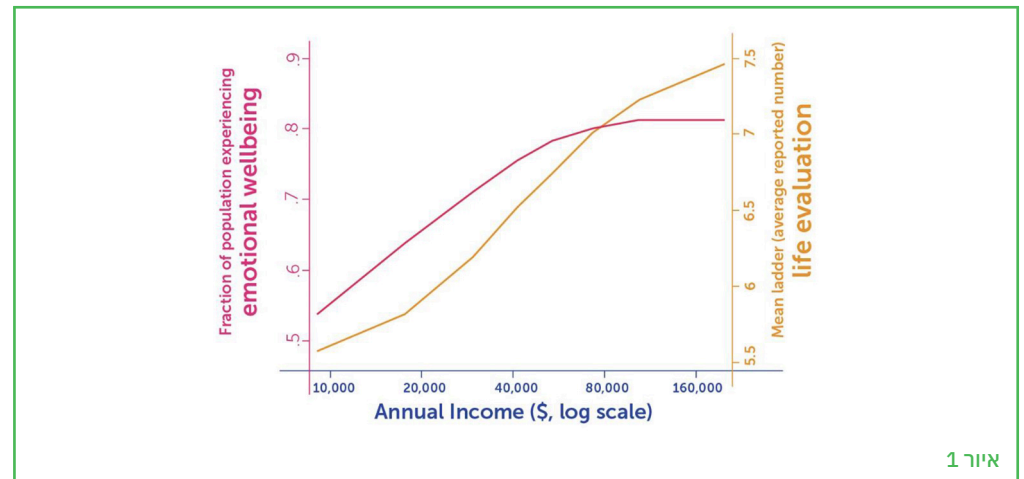
האושר הרגעי, המיוצג כאן כמידת הרווחה הרגשית (קו ורוד), מפסיק לעלות ברמת הכנסה מסוימת (כ-75,000 דולר אמריקאי ב-2010). שביעות רצון כללית מהחיים, המיוצגת כאן כמידת הערכת איכות החיים (קו צהוב), ממשיכה לעלות ככל שההכנסה השנתית עולה. התוצאות הללו מראות שיש היבטים רבים לאושר, הפועלים בצורה שונה בתגובה לאירועי החיים (האיור נלקח מ-[3]).

Fraction of population experiencing emotional wellbeing = החלק היחסי באוכלוסייה שחווה רווחה רגשית;

Mean ladder (average reported number) – life evaluation = הסולם

הממוצע (המספר הממוצע המדווח) של שביעות הרצון הכללית בחיים;

Annual Income (\$, log scale) = הכנסה שנתית (בדולרים אמריקאים, סולם לוגריתמי).



איור 1

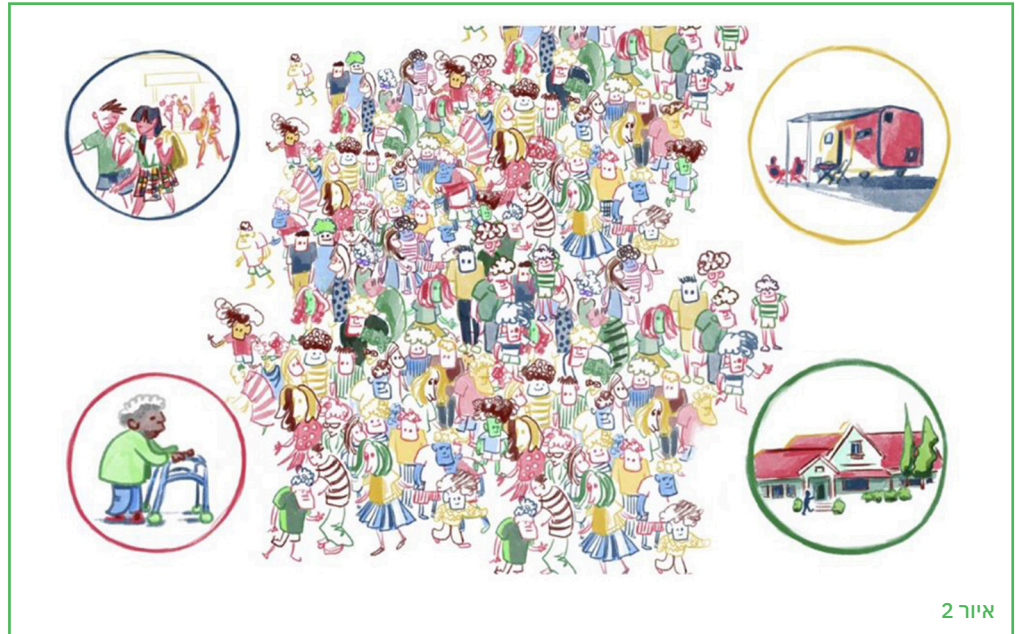
כיוון שנושא הרווחה האנושית הוא מורכב, מאתגר להגדיר אותו, למדוד אותו, ולתרגם את התוצאות למדיניות ולתקנות כלכליות מועילות. אני מאמין שבבוא העת נגבש הבנה ברורה יותר של ההיבטים התורמים לרווחה האנושית, שתעזור לנו לכון את הכלכלה כך שנוכל להגיע אל הרווחה האנושית המרבית.

רווחה כלכלית – אנשים בודדים לעומת קבוצות גדולות

ההתנהגות הכלכלית הממוצעת של קבוצות אנשים שונה מאוד מהתנהגותם של הפרטים המרכיבים את הקבוצות הללו (איור 2). כמו כן, יש חשיבות לאינטראקציות בין אנשים (ובין משתתפים אחרים, כמו תְּבָרוֹת). אם ננסה להבין רק את האופן שבו אנשים (או שחקנים אחרים) פועלים כ**יחידים**, אולי לא נקבל את ההסבר המלא לדרכים שבהן הם פועלים כשהם מתאגדים לקבוצות.

איור 2

ההתנהגות הכלכלית של קבוצות אנשים שונה מזאת של יחידים. כשאנחנו רוצים לראות את התמונה הכלכלית המלאה, עלינו לבחון גם את ההתנהגות הכלכלית הממוצעת של קבוצות אנשים (במרכז), וגם את המצב הכלכלי של יחידים ושל תת-קבוצות שבתוך הקבוצה הגדולה (ארבעת העיגולים מסביב).



איור 2

נניח שאני חקלאי ושהיבול שלי השנה היה משובח מאוד. כשאני מביא אותו לשוק, אני חושב לעצמי: "איזה יופי! השנה אהיה עשיר!" אבל מתברר שגם לחקלאים רבים אחרים היו יבולים נהדרים, ולכן מחיר היבול יורד כל כך עד שבעצם נעשיתי עני יותר (איור 3). זוהי דוגמה פשוטה למה שקורה כאשר אנחנו מסתכלים על התוצאה המשולבת של פעולות בודדות רבות: לעיתים קרובות אנחנו מגלים שהתמונה הכללית שונה מאוד מזאת שרואים ברמת הפרט.

איור 3

התמונה הכלכלית עבור יחידים עשויה להיות שונה מהתמונה הכלכלית עבור קבוצות גדולות. (A) כשיבולי התירס גדלים בשפע בשנה מסוימת, חקלאים פרטניים מצפים לרווח גדול. (B) עם זאת, לחקלאים רבים יש שפע של יבולי תירס. (C) כיוון שיש זמינות גבוהה של תירס, מחיר התירס יורד, והחקלאים מקבלים פחות כסף עבור כמות זקה. הם עלולים אפילו להרוויח סכום כולל נמוך יותר, על אף שיש להם יותר יבול.



איור 3

תוצר מקומי גולמי (תמ"ג)
(GDP)
(Gross Domestic Product)

הערכה של המצב הכלכלי של המדינה. זהו הערך הכולל של מוצרים ושל שירותים שמדינה מסוימת מייצרת בשנה.

לכן אין זה מספיק להתבונן רק על מה שקורה בממוצע, עלינו לבחון את מה שקורה מתחת לפני השטח, כלומר על מה שקורה ברמת הפרט וכן ברמה של קבוצות האנשים הרלוונטיות. לדוגמה, עמיתתי אן קייס (Anne Case) ואני הראינו שכמעט כל הרווחים בתוצר המקומי הגולמי (תמ"ג) בארצות הברית מאז 1970 הגיעו רק לשליש מהאוכלוסייה האמריקאית – שהם אנשים שהשלימו לפחות ארבע שנות לימודים לתואר באוניברסיטה. [4]. שני השלישים האחרים של האוכלוסייה – אנשים ללא תארים אקדמיים – לא הרוויחו מהעליות בתמ"ג. לכן כדי לדעת אם מצבם הכלכלי של האמריקאים הוטב בעקבות העלייה

בתמ"ג, עלינו לבחון לעומק קבוצות פרטניות של אנשים, ואפילו עד לרמת האנשים הבודדים, כדי להבין את מצבם הכלכלי.

לסיכום, כדי להבין את הכלכלה ברמה הכללית, ואת הרווחה האנושית בפרט, עלינו לבחון אותה הן ברמת הפרט הן ברמה הקבוצתית. רק השילוב של שתי נקודות המבט הללו מאפשר לנו לראות תמונה מלאה של כל מצב נתון. כפי שראיתם, הכלכלה אינה עוסקת רק בכסף, אלא בשאלות הרבה יותר רחבות, כמו כיצד אפשר לשפר את מצבם הכלכלי של אנשים? ואיך אפשר להיטיב את איכות חייהם הכללית?

המלצות למוחות צעירים

העצה הראשונה שלי למדענים הצעירים מבינכם היא: אל תחששו "לשחות נגד הזרם". חלק משמעותי מעשייה מדעית מוצלחת הוא שכל מדענית ומדען תורמים את נקודת המבט וצורת החשיבה הייחודיות להם. גם אם עמיתים לא יסכימו עם דעותיכם, הישארו נאמנים לדרככם האישית, ודעו שאולי בעתיד תגלו תגליות מפתיעות.

כשאתם בוחרים את העיסוק שלכם, כדאי שתאפשרו לתשוקות שלכם להוביל אתכם, אך שימו לב שהן בנגדר ההיגיון. בחרו בתחום שהוא בעל חשיבות אישית עבורכם, אך שיש בו גם תועלת לאחרים. אחד הדברים שנראים לי הגיוניים בעולם של היום, למשל, הוא להשקיע את האנרגיות שלכם להתמודדות עם שינויי האקלים. על אף שדרך זו אינה פשוטה והיא רצופה בקשיים, תהיו מסופקים ומרוצים כשתלמדו דברים חדשים על העולם ותיישמו אותם כדי לשפר את סביבתכם.

למי מכם שיבחרו בקריירה אקדמית, אני ממליץ לכם קודם כול לצבור רקע אקדמי מעמיק בתחום מחקר אחד שתבחרו לפני שתחקרו תחומי מחקר מועילים אחרים. יש חשיבות רבה במקצועות רבים ללימודי המתמטיקה, שעוזרים למדענים ולכלכלנים לפתח מודלים ותיאוריות, וברמה הבסיסית ביותר – לוודא שאנחנו פועלים בהיגיון ונמנעים מטעויות מיותרות.

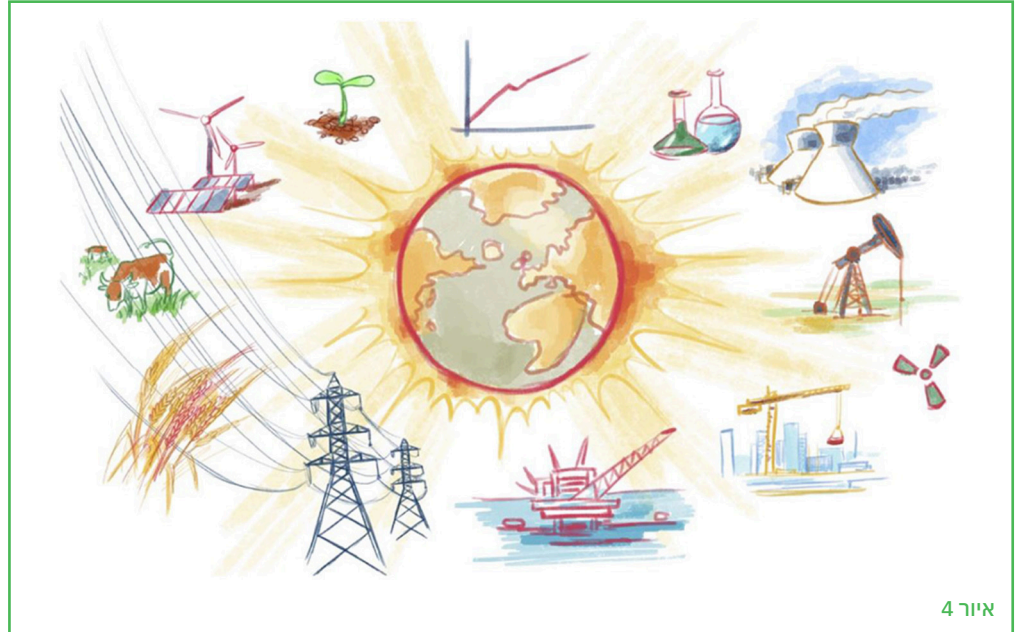
לבסוף, עליכם – הילדים בני דורכם – לדרוש מאיתנו המבוגרים לתת דין וחשבון על העולם שאנחנו משאירים עבורכם. אל תסכימו לקבל עולם הרוס (איור 4). אם אנחנו המבוגרים מתנהגים בצורה שאינה אחראית ומכלים את משאבי כדור הארץ, לכם ולילדיכם יהיה קשה יותר בעתיד. כבר היום קיימות אפשרויות פעולה רבות כדי להציל את כוכב הלכת שלנו מנזק נוסף, ועלינו למצוא דרכים ליישם את הצעדים הללו בהקדם האפשרי. הבחירות שנעשה כעת ישפיעו על דורות העתיד. התפקיד שלכם הוא להניע את הפעולות הללו קדימה באמצעות דרבון של הדור המבוגר לקבל את ההחלטות הנכונות היום, כדי לוודא שהדור שלכם והדורות הבאים יוכלו לחיות חיים טובים על כדור הארץ.

תודות

ברצוני להודות לנועה שגב על עריכת הריאיון שהיווה את הבסיס למאמר זה, ועל כתיבה משותפת של המאמר. תודה לאלכס ברנשטיין עבור האיורים.

איור 4

עתיד כדור הארץ בידינו.
 מקורות האנרגיה שבהם אנחנו בוחרים להשתמש בחיי היום-יום, האופן שבו אנחנו משתמשים באדמה, הדרכים שבהן אנחנו מייצרים את המזון שלנו, והתהליכים שאנחנו מיישמים בתעשייה ובחקלאות שלנו – משפיעים רבות על חיינו בכדור הארץ בהווה ובעתיד. על הצעירים לדרוש מהמבוגרים להיות אחראים על מצב העולם שהם משאירים אחריהם, ולעזור להם לקבל החלטות שיובילו לעתיד טוב יותר לדורות הבאים.



איור 4

חומרים נוספים

הבריחה הגדולה: בריאות, עושר ומקור אי-השוויון (אנגלית) – סֶפֶר מאת פרופ' אנגוס דיטון על ההיסטוריה של הכלכלה ועל השפעותיה על בריאותינו ועל רמת החיים שלנו.

<https://deaton.scholar.princeton.edu/great-escape>

מקורות

1. Sen, A. 2003. "Development as capability expansion," in Readings in Human Development, ed. S. Fukuda-Parr (New Delhi; New York, NY: *Oxford University Press*).
2. Kahneman, D., and Deaton, A. 2010. High income improves evaluation of life but not emotional well-being. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 107:16489–93. doi: 10.1073/pnas.1011492107
3. Gotoh, R., and Dumouchel, P. 2009. *Against Injustice: The New Economics of Amartya Sen*. Cambridge: *Cambridge University Press*.
4. Case, A., and Deaton, A. 2021. *Deaths of Despair and the Future of Capitalism*. Princeton, NJ: *Princeton University Press*.

פורסם אונליין: 19 בספטמבר 2024

נערך על ידי: Idan Segev

מנחים מדעיים: Suparna Chakraborty | Abraham Pascoe

ציטוט: Deaton A (2024) כלכלה: הרבה יותר מִמְכֶסֶף. Front. Young Minds. doi: 10.3389/frym.2023.1131591-he

תורגם והותאם מ: Deaton A (2023) The Economy: Much More Than Money. Front. Young Minds 11:1131591. doi: 10.3389/frym.2023.1131591

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

זכויות יוצרים © 2023 © Deaton 2024. 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

MATEO, גיל: 10

אני תלמיד כיתה ד'. אני אוהב פוקימון, רופ'ולוקס ולגו. כשאגדל אני רוצה לעסוק במדעי המחשב. הספר האהוב עליי הוא "הארי פוטר ואבן החכמים".



RYKA, גיל: 14

ריקה היא מדענית צעירה בהתהוות. היא בת 14 ואוהבת לעסוק במחקר בתחומי הבלשנות החישובית והרפואה. היא אוהבת מוזיקה ולומדת באופן מקצועי הלחנה וניגון בפסנתר. אחד הפרויקטים האחרונים שלה בוחן את היישום של מוזיקה להפחתת התמכרות לאופיואידים. יצירותיה גם בוצעו על הבמה על ידי מועמד לפרס הגראמי! פרט למדעי המחשב ולמוזיקה, ריקה נהנית גם מצפייה בתוכניות על פשע. המשחק האהוב עליה הוא Unsolved Case Files, שבו היא יכולה להרגיש כמו בלשית אמיתית.



הכותבים

ANGUS DEATON

סר אַנגוס דֵיטון הוא כלכלן בריטי-אמריקאי. לפרופסור דֵיטון יש תואר ראשון, שני ושלישי בכלכלה מאוניברסיטת קיימברידג', בריטניה. בין 1976 ל-1983 עבד כפרופסור לאקונומטריקה באוניברסיטת בריסטול (בריסטול, אנגליה). בשנת 1983, הפך פרופ' דֵיטון לחבר פקולטה קבוע באוניברסיטת פרינסטון שבניו ג'רזי, ארצות הברית. בשנותיו באוניברסיטת פרינסטון מונה פרופ' דֵיטון למשרה על שם פרופסור דווייט ד. אייזנהאואר לעניינים בינלאומיים, וכיהן כפרופסור לכלכלה ולעניינים בינלאומיים בבית הספר לעניינים ציבוריים ובינלאומיים ובמחלקה לכלכלה. במהלך תקופה זו, הוא גם היה חבר בוועדה המייעצת של הכלכלן הראשי של הבנק העולמי, מדען בכיר של ארגון גאלופ (Gallup Organization), ונשיא האגודה האמריקאית לכלכלה. במהלך הקריירה שלו, פרופ' דֵיטון חקר נושאים חשובים בכלכלה ותרם להתפתחותם, לרבות ביקוש וחסכון, ומדידה של רווחה כלכלית ושל עוני. פרופ' דֵיטון זכה בפרסים רבים



על פועלו, ביניהם מדליית פְּרִיש (1978), פרס Frontiers of Knowledge של ה- (2011) BBVA, ופרס נובל למדעי הכלכלה (2015). [*deaton@princeton.edu](mailto:deaton@princeton.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



קרן משפחת
שעשוע
Shashua Family Foundation

פרונטירז מדע לצעירים

משימתנו

לפרסם תוכן מדעי איכותי, ברור ואמין, המעורר עניין ומפתח חשיבה ביקורתית בקרב הדור הבא של המדענים והקהל הרחב. מדע יכול להיות נגיש לכולם.

איך אנו עושים זאת?

מדענים מהשורה הראשונה כותבים על אודות מחקריהם ותגליותיהם באופן ייעודי לצעירים; הסוקרים הצעירים שלנו, יחידים או כיתות, הפרוסים ברחבי העולם, בודקים כל מאמר במסגרת ביקורת עמיתים, בהדרכת המנחים המדעיים שלהם ושולחים את המלצותיהם למדענים.

המדענים משפרים את המאמר בעקבות ההערות וההארות האלה. תהליך זה מבטיח שהתוכן שאנחנו מפרסמים יהיה ברור ומובן לקוראים הצעירים, ויעורר בהם עניין, סקרנות, וכישורי חשיבה ביקורתית.



גלו את המאמרים החדשים שלנו

← קראו כעת

רשתות חברתיות

- @FrontYoung_IL
- פרונטירז - מדע לצעירים
- @frontiers_il
- @kids.frontiers

צרו קשר

kids.hebrew@frontiersin.org

