

תְּאִי מִיקוּם: תְּאִי הַמוֹחַ שֶׁעוֹזְרִים לָנוּ לִמְצוֹא אֶת דְּרַכְנוּ בַּעוֹלָם

John O'Keefe*

מרכז סיינסבורי וולקס 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 מִיקוּם

מפת המיקומים המנטלית הזאת נוצרת במוח באמצעות תאים מיוחדים הנקראים **תָּאֵי מִיקוּם** [1]. תָּאֵי המיקום נמצאים באזור במוח הנקרא **הִיפּוֹקָמְפּוּס**, 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 מִיקוּם (Place Cells)

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

הִיפּוֹקָמְפּוּס (Hippocampus)

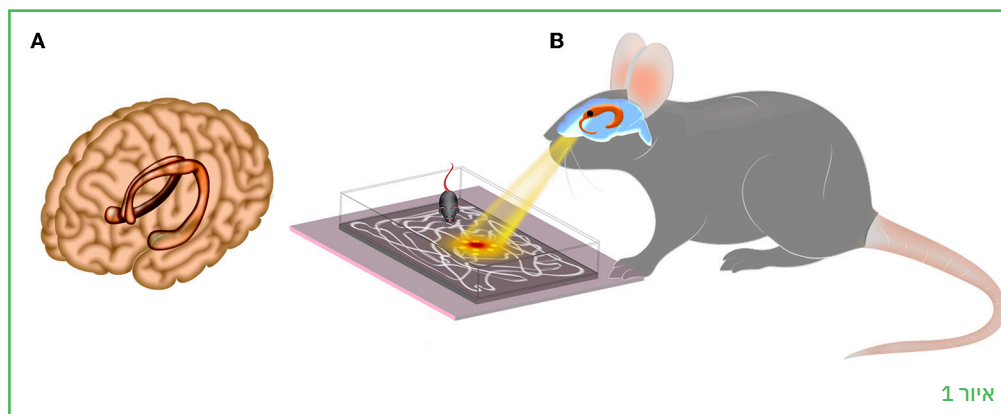
אזור שצורתו מזכירה סוסונים הממוקם עמוק במרכז המוח – בין האוזניים, הוא מכיל את תָּאֵי המיקום, המהווים חֵלֶק חשוב ממערכת הניווט של המוח.

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 בהיפוקמפוס 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>).

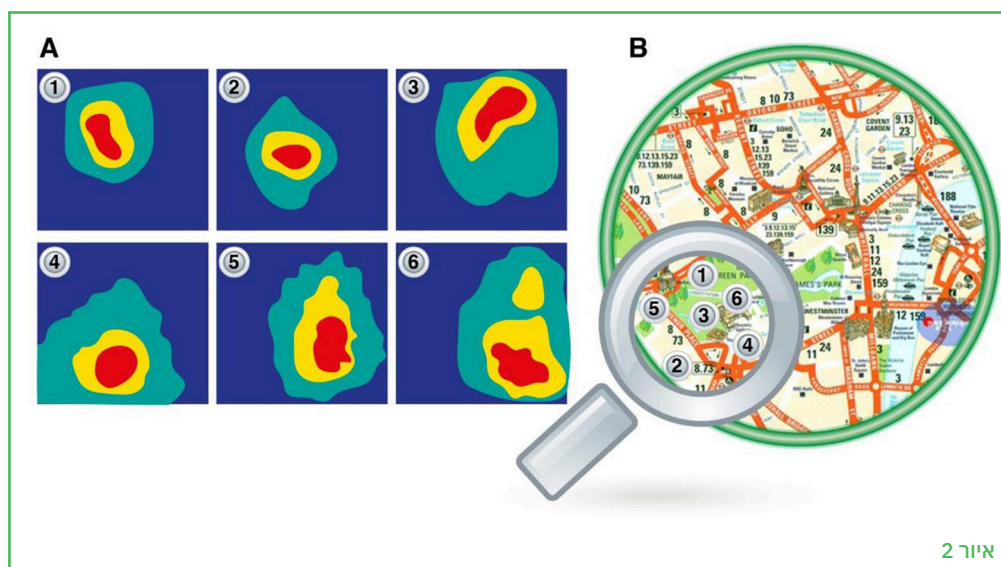
איור 2

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 בסביבה 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 בהיפוקמפוס 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 מניעות 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 לְחוּת 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 לְרָאוֹת 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 לְחַוֵּת 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 לְחוּת

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 ברצייות 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 בתיקונם! 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 עֶצֶב 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 קָבְלִי (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