



חכמה בלילה: מה למדתי מהתנשמת הלבנה על אודות קשב ראיתי?

Hadar Beeri*, Yoram Gutfreund

המחלקה לניורוביולוגיה, הפקולטה לרפואה ומכון המחקר על שם רות וברוך רפפורט, הטכניון – מכון טכנולוגי לישראל, חיפה

סוקרים צעירים

"ORT DAFNA"
MIDDLE
SCHOOL,
KIRYAT BIALIK



גיל: 13

קשב ראיתי הוא תהליך המאפשר לשים לב לפרטים הנקלטים דרך העיניים. מטרתו למקד אותנו בדברים החשובים לנו, תוך הימנעות מהסחות דעת. מחקר העוסק בקשב ראייתי נחוץ עבור מגוון תחומים בחיינו ובהם טיפול בהפרעות קשב ופיתוחים טכנולוגיים דוגמת רכבים אוטונומיים. כיצד ניגשים לחקר נושא כזה? והאם ניתן לעשות זאת בעזרת חיה שהתפתחה בנפרד מאיתנו במשך 300 מיליון שנים? מסתבר שכן. התנשמת היא מין של דורס לילה, קרובת משפחה של הינשופיים. היא מתמחה בציד בתנאים קשים בזכות מערכות ראייה ושמיעה חדות במיוחד. משום כך, תנשמות משמשות חיות מודל חשובה בחקר מערכות חושים וקשב, והן אף מלמדות אותנו רבות על עצמנו, בני האדם. במאמר זה נספר על כך ועוד, מנקודת מבטה של חוקרת המוח.

מהו קשב?

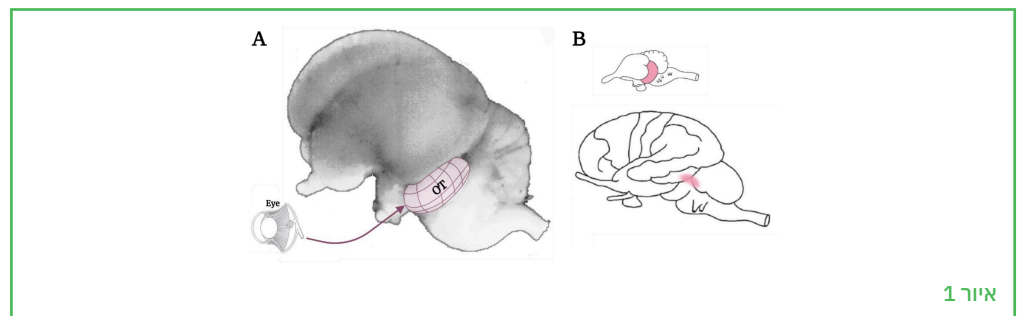
בצעירותי תהיתי לא פעם – מדוע אחי נוסע לבית ספר מיוחד לילדים עם הפרעות קשב? למה אני מרגישה שהוא מבולבל יותר ממני? כשגדלתי, התרגשתי נוכח ההבנה שיש

באפשרותי לחקור לעומק את המנגנון שכנראה אחראי לכך, הקֶשֶׁב. ככל שלמדתי, כך גיליתי עד כמה מדובר בתהליך מורכב. קשב מתחיל בקליטת מידע מהסביבה דרך איברי החישה (עיניים, אוזניים, אף וכדומה); ממשיך בעיבוד המידע על ידי המוח ומסתיים לרוב בהפניית המבט או הגוף אל עֵבֶר מוקד עניין כלשהו; וכל זה בשבריר שנייה! איך ניגשים ללמוד נושא כל כך סבוך? התשובה בהמשך.

להקשיב עם העיניים

לחיות בעולם שבו אנחנו מוצפים בגירויים מהסביבה בכל רגע נתון, זו משימה מאתגרת במיוחד. האם אנו מוטרדים מכך? הודות למוח המשוכלל שלנו, כמעט שלא. למעשה, כל פעולה הנראית לנו כפשוטה, מְלֵאָה בסינון של מידע רב המגיע מהסביבה. יְקָלְתָם של בעלי החיים להתרכז בפרטים חשובים, היא בעלת חשיבות הישרדותית גבוהה. מתוך צרכים כמו השגת מזון; מציאת בן/בת זוג ראויים והימנעות מִסְכָּנוֹת, התפתח לאורך מאות מיליוני שנים מנגנון הקשב.

מנגנון זה רגיש להיבטים רבים של החיים כגון מצב רגשי; יָדַע וזיכרון; עֲרָנוֹת ועוד. גירויים רבים המתקבלים דרך קולטני החישה השונים, מגיעים לאזור במוח אשר נקרא **התליל העליון**. שָׁם מתבצע תְּעֻדוּף שלהם, ונקבע עד כמה הם היו בולטים לעומת גירויים אחרים. גירוי ייחשב בולט ככל שיהיה עוצמתי יותר, שונה ומפתיע. נוסף על תעדוף של כל גירוי, נשמר ייצוג של מיקומו במרחב. שלב זה נקרא **מיפוי בולטות (איור 1)**. בהמשך התהליך, המידע עובר עיבוד מסובך יותר ויותר באזורים נוספים במוח. כלומר, על המידע שנשמר לגבי בולטות ומיקום הגירוי, מתווסף מידע לגבי תכונות הגירוי (צבע, תָּדָר צליל וכדומה). כמו כן מתווסף מידע באשר לעד כמה ישנה הלימה בין הגירוי לבין הצורך הרגעי להגיב אליו (לצורך המחשה, עד כמה אדם זקוק להושיט יד לפיצה כאשר הוא רעב לעומת כשהוא שָׂבֵעַ). לאחר מסע פתלתל שנמשך חלקיקי שניות, המידע שנצבר מגיע לאחד מיעדיו העיקריים – אזור במוח שאחראי על הוצאה לפועל של תנועות עיניים וראש. שָׁם, ניתנת פקודה לשרירים המעורבים בהפניית המבט, ואצל חיות מסוימות האוזניים, אשר מוסטים לְעֵבֶר המוקד המרחבי שבו הופיע הגירוי שנבחר כמשמעותי ביותר.



איור 1

לפיכך, **קשב ראייתי**, המכונה גם קשב חזותי/ ויזואלי, הוא עיבוד קֶשֶׁבִי של מידע המתקבל דרך קולטני האור שבעיניים. זהו סוג הקשב הנחקר ביותר בְּשָׁל העובדה כי ניסויים המתבססים על חוש הראייה הם הנוחים ביותר לביצוע – בבעלי חיים בכלל, ובבני אדם בפרט. מגוון מדענים משתמשים בכלים שונים וייחודיים כדי ללמוד עוד על המנגנון המרתק הזה, מפסיכולוגים, דרך ביולוגים ואקולוגים ועד לפילוסופים.

תליל עליון (Superior colliculus) אצל יונקים; Optic tectum אצל שאר בעלי החיים

מבנה במוח המקבל מידע מאיברי חישה שונים, ובו מתבצע עיבוד קשבי ראשוני.

מיפוי בולטות (Saliency mapping)

שלב ראשוני במנגנון הקשב, מתרחש בתלילים העליונים. במסגרתו מתבצעת השוואה בין מאפיינים פיזיקליים של הגירויים (כמו עוצמה וכיוון תנועה), ונוצרת מפה המייצגת את מיקומיהם וייחודיותם במרחב האמיתי של החיה.

איור 1

(A) מוח של תנשמת לבנה במבט מצד שמאל. בוורוד מסומן אזור הנקרא 'optic tectum' (OT), בעברית – התליל העליון. מידע שהעין קולטת מועבר ישירות לתליל העליון (חץ ורוד), שָׁם מתבצע עיבוד ראשוני שנקרא 'מיפוי בולטות'. (B) איור המציג מוחות של עוף (עליון) ושל קוף (תחתון). התליל העליון מסומן בוורוד. הבדלי הגודל בתמונה מסמלים את ההבדלים הקיימים במציאות אך אינם מדויקים.

קשב ראייתי (Visual attention)

תהליך המתרחש באזורים רבים במוח, ומאפשר התמקדות במידע נחוץ המתקבל מהעיניים תוך התעלמות ממידע מיותר.

התנשמת לבנה ממוקדת מטרה

התנשמת הלבנה (*Tyto alba*) היא מין של דורס לילה, ממשפחה המקבילה למשפחת הינשופיים. בדומה לבני אדם, נקבה וזכר ממשפחת התנשמתיים שנהיים זוג, לרוב מזדקנים יחד. הם מגדלים יחד צאצאים ודואגים להם למזון ולחום עד אשר יגדלו ויעזבו את הקן. התנשמת ניזונה בעיקר ממכרסמים, אך גם מעופות קטנים ומזוחלים, שאותם היא צדה בחשכת הלילה תוך תעופה חרישית ומדויקת. לְשֵׁם כך היא משתמשת ביכולת יוצאת מן הכלל של **אֶכָּן קוֹל** (זיהוי של מקום במרחב שממנו מגיע צליל מסוים), ובראייה חדה גם בתנאי אור ירודים.

בתחילת שנות ה-60 של המאה הקודמת, בעולם מדעי שבו **חיית מוֹדֵל** עיקרית הייתה מזונה של התנשמת, העכבר, הֶחָל מְסָאקָאזו 'מָרְק' קוֹנִישִׁי את דרכו המחקרית. קונישי היה מדען מוח והתנהגות מהמכון הקליפורני לטכנולוגיה (Caltech), אשר התמחה בעופות. אחד העופות הבולטים במחקרו היה התנשמת הלבנה. כחלק מעבודתו, קונישי גילה את כישורי הַצִּיד המופלאים של תנשמות (**איור 2**). עובדה זו גרמה לו להבין את הפוטנציאל הרב של התנשמת לְשֵׁם חיית מודל, בין השאר עבור ניסויים הקשורים בהפניית תשומת הלב אל עֶבֶר גירוי בולט [1]. בעקבותיו, חוקרי מוח נוספים החלו להשתמש בתנשמות במעבדותיהם.



איור 2

לבחירת חיית המודל נודעת חשיבות רבה, ויש להתאים עד כמה שניתן בין שאלת המחקר לבין תכונות החיה. באשר לתנשמות, מחקרים רבים לאורך השנים הראו כי בזמן ביצוע מטלה המערבת קשב, ישנם מבנים במוחה של התנשמת הפועלים באופן דומה מאוד למבנים במוח האדם. יתרה מזו מבחני קשב התנהגותיים, כמו לדוגמה מבחן איתור של חפץ מסויים בין הרבה חפצים, מצביעים על תבנית תגובה דומה בתנשמות ובבני אדם [2]. לכן, עבודה עם תנשמות מציעה ערך מוסף משמעותי בדמות השוואה ואף השלכה של הממצאים על מנגנון הקשב בבני אדם.

אֶכָּן קוֹל

(Sound localization)

היכולת לאתר כיוון ומרחק של מקור קול.

חיית מוֹדֵל

(Model animal)

לרוב חיית מעבדה (בניגוד לחיות בר המשמשות במחקר שדה, או חיות משק המשמשות בחקלאות). נבחרת חיה בעלת תכונות המאפשרות לערוך מחקר שתוצאותיו עשויות לשפוך אור על הביולוגיה של חיות אחרות.

איור 2

תנשמת לבנה צדה עכבר בחשכה. צילום תת-אדום (אינפרא-אדום) מאפשר ביצועו בחושך מוחלט. הצילום מתעד תנשמת מתכוננת לצייד תוך כדי תעופה, וכן נחיתה מדויקת לְעֶבֶר העכבר. התמונה צולמה על ידי פרופ' מָרְק קוֹנִישִׁי ז"ל.

התהליך המחקרי שביצענו

על פי חוקרי אבולוציה רבים, לפני כ-300 מיליון שנים הִחֵלָה היפרדות בין מחלקת היונקים למחלקת העופות. כלומר, איברי גוף שעד אז היו משותפים לשתי המחלקות עברו שינויים כך שיתאימו יותר ויותר לסביבת החיים המשתנה של החיה, כמו למשל התפתחות זרועות לעומת כנפיים. במעבדה שלנו אנו טוענים כי למרות ההתפתחות המשמעותית של מוח היונקים במהלך האבולוציה, כמה אזורים הקשורים בעיבוד קשב ראייתי שמרו על מבניהם ועל תפקודיהם. כדי להוכיח את הטענה, עלינו להשוות בין מנגנוני קשב של יונקים ובין מנגנוני קשב בְּקָרָב מחלקות בעלי חיים אחרות. כיוון שתנשמות מהוות מודל מוצלח בְּחֵקֶר הקשב, בחרנו להשתמש בהן עבור ההשוואה בין יונקים ובין עופות.

שאלת המחקר שהובילה אותנו הייתה כיצד פועלים אזורים שונים במוח התנשמת בעת ביצוע מטלה קִשְׁבִית? כדי לדייק את התשובה יצרנו פרויקטים נפרדים שבהם בדקנו כמה סוגיות: כיצד מתרחש מיפוי בולטות בתלילים העליונים של תנשמות? באיזה אופן מועבר בין אזורי מוח שונים מידע לגבי שני גירויים המתחרים בבולטות שלהם? האם ניתן לִצְפֹּת בתנשמת מבצעת מבחן קשב ראייתי ולנחש מתוך כך כיצד פעלו אזורי הקשב שלה?

לאחר מכן עיצבנו ניסויים פיזיולוגיים והתנהגותיים שכללו כמה כלים ושיטות מחקר. תחילה יצרנו את המטלה הִרְאִית שבה התנשמת צפתה במהלך הניסויים; צמד עיגולים מופיעים במקום קבוע ובמרחק קבוע זה מזה. כל עיגול מתרחב במהירות שונה ונעלם. הופעה זוגית זו חוזרת על עצמה, כאשר הפער בין המהירויות משתנה בכל חזרה (איור 3A). כך נוצרת בכל הופעה תחרות בין המהירויות של שני העיגולים ובין גודליהם, ולכן לכל עיגול בולטות שונה בהשוואה למתחרה שלו. במטלה זו משתתפות תנשמות בשני מצבים שונים: תנשמת מתנהגת – התנשמת חופשייה לעוף, אך בוחרת לעמוד מול מסך ולצפות בגירויים בתמורה למזון (סרטון 1); תנשמת מאולחשת – מטושטשת בגז צחוק ומקובעת מול מסך. באמצעות התנשמת המאולחשת אנו בוחנים פעילות מוחית. בעזרת מיקרוסקופ ובידיים מיומנות, אנו מחדירים למוח החיה אֶלֶקְטְרוֹדָה (מחט עדינה במיוחד שבאמצעותה ניתן לחוש בפעילות חשמלית של המוח) בשיטה הנקראת אלקטרופיזיולוגיה. מאחר שבתוך המוח אין חיישני כאב, והודות לאֶלְחֹשׁ, החיה אינה מרגישה באלקטרוודה.

ניתוח תוצאות המחקר

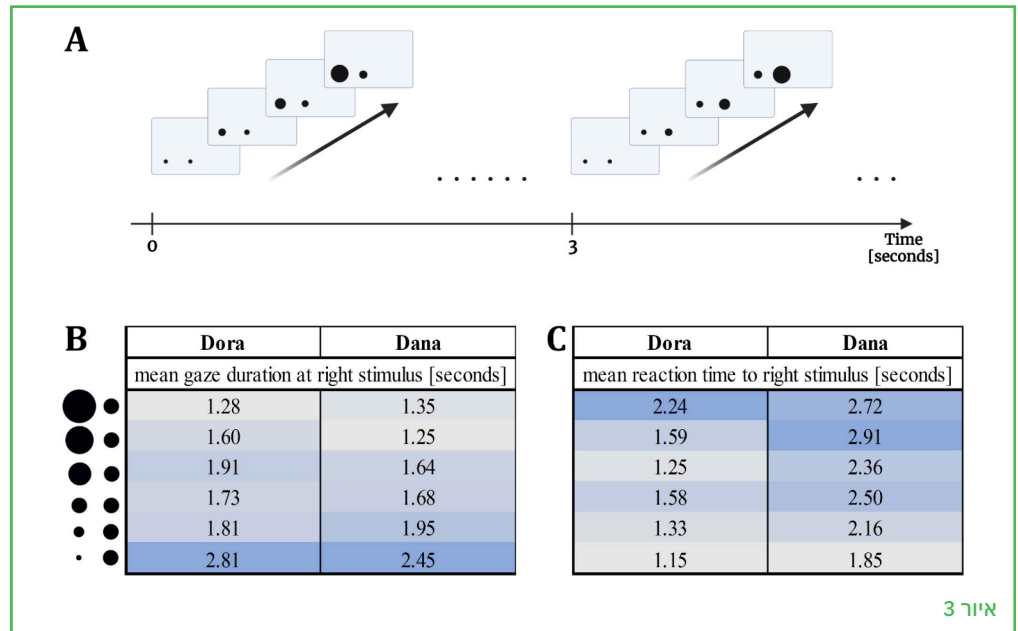
בסיום הניסויים מבצעים ניתוח של הנתונים. מטרת שלב זה במחקר היא להסיק מסקנות ולענות על שאלות המחקר מתוך התוצאות שנאספו. עבור ניתוח הנתונים של הניסוי ההתנהגותי, השתמשנו בתוכנת מחשב העוקבת אחרי תנועות הראש של התנשמת. גילינו כי ככל שפער המהירויות בין שני גירויים היה גדול יותר, כך התנשמת הפנתה את מבטה מהר יותר (איור 3B) ולזמן ממושך יותר (איור 3C), אל עֵבֶר העיגול בעל המהירות הגבוהה יותר. כלומר, ככל שגירוי בולט יותר לעומת האחר, כך הוא מושך יותר את תשומת ליבה של החיה. דבר זה ודאי נשמע לכם מובן מאליו, אך במדע כמו במדע (ובדומה למערכת המשפטית) – אין עֵבֶדוֹת ללא הוכחות.

אלקטרופיזיולוגיה (Electrophysiology)

תחום מחקר מדעי הבוחן פעילות חשמלית של מרכיבי המוח – מתאי עצב בודדים ועד המוח השלם.

איור 3

ניסוי קשב ראייתי בתנשמות מתנהגות. **A.** הניסוי: המלבנים האפורים מייצגים את המסך שעליו מוצגים הגירויים. בכל חזרה של המבחן, מופיעים שני עיגולים המתחרים ביניהם במהירות שבה הם מתרחבים. חזרה אחת מיוצגת על ידי חץ אלכסוני, כך שבסיומו מצביע על תחילת ההתרחבות (כאשר שני העיגולים שווים בגודלם), וראשו מצביע על סיום ההתרחבות (עיגולים בגדלים שונים). ציר הזמן מְדִי 3 שניות מופיעה חזרה נוספת של צמד גירויים, ושורת הנקודות מייצגת את הזמן שעובר בין החזרות הרבות. **B.** בטבלה מוצגים ממוצעי מהירויות תגובה לגירוי הימני, **C** ממוצעי משכי תגובה עבור כל זוגת הגירויים. התוצאות מסכמות תגובות של שתי תנשמות ממין נקבה: דנה ודורה.



איור 3

מניתוח הנתונים שנאספו במסגרת ניסוי האלקטרופיזיולוגיה, ראינו כיצד הפעילות המוחית בתליל העליון מתחזקת כאשר הפער בין מהירויות הגירויים גדל. לכן הסקנו, כי ככל שגירוי אחד בולט יותר בהשוואה לאחר, כך הפעילות המוחית חזקה יותר, וכפועל יוצא התגובה ההתנהגותית (הפניית מבט) מהירה ועוצמתית יותר. נוסף על כך גילינו ממצא מפתיע מאוד, שלפיו הייצוג של מיקום הגירוי שנוצר בתליל העליון נעלם באזורי עיבוד קשב אחרים במוח, שאותם בדקנו. תוצאה זו הובילה אותנו לשאלת מחקר חדשה, שעליה אנו מנסים לענות כיום: אם המיקום המרחבי אכן לא קיים באזורי עיבוד קשב נוספים במוח, כיצד החיה יודעת היכן ממוקם הגירוי החשוב שאליו תצטרך להפנות את מבטה?

השלכות המחקר בחיי היומיום

כיום, האנושות נהנית מהפירות שהניב חקר הקשב לאורך השנים. אנו מבינים עתה יותר כיצד המוח מתפקד ותופס את העולם בקרב המתמודדים עם אוטיזם (הפרעת התפתחות המשתרעת על קשת מצבים ודרגות חומרה שונים, ומקשה על הלוקה בה לקיים אינטראקציה תקשורתית וחברתית); בעיות קשב; פגיעות מוחיות וכן בקרב פעוטות. במישור אחר, חקר הקשב מאפשר לנו לפתח טכנולוגיות כמו רכבים אוטונומיים המתמודדים עם מידע ראייתי, מסננים אותו ומגיבים לשינויים בזמן אמת, תוך כדי תנועה. בעתיד, אנו מקווים כי ממצאי המחקר שלנו ישמשו חוקרים מתחומים שונים במטרה לקדם את העולם!

מקורות

1. Knudsen, E. I., and Konishi, M. 1979. Mechanisms of sound localization in the barn owl (*Tyto alba*). *J. Comparat. Physiol.* 133:13–21. doi: 10.1007/BF00663106
2. Lev-Ari, T., Zahar, Y., Agarwal, A., and Gutfreund, Y. 2020. Behavioral and neuronal study of inhibition of return in barn owls. *Sci. Rep.* 10:1–12. doi: 10.1038/s41598-020-64197-9

פורסם אונליין: 28 בפברואר 2023

עורך: Idan Segev

נמחה מדעית: Stella Danon

ציטוט: Beeri H and Gutfreund Y (2023) חכמה בלילה: מה למדתי מהתנשמת הלבנה על אודות קשב ראייתי? Front. Young Minds. doi: 10.3389/frym.2022.1008920-he

תורגם והתאם מ: Beeri H and Gutfreund Y (2022) What the Barn Owl Can Teach Us About Human Visual Attention. Front. Young Minds 10:1008920. doi: 10.3389/frym.2022.1008920

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

COPYRIGHT © 2022 © Beeri and Gutfreund 2023. 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 למחבר(ים) 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

"ORT DAFNA" MIDDLE SCHOOL, KIRYAT BIALIK, גיל: 13

אנו כיתת עבודה למנהיגות מדעית טכנולוגית של שכבת ז בחטיבת ביניים אורט דפנה, קריית חינוך אורט קריית ביאליק. הכיתה מורכבת מתלמידים מצטיינים בעלי זיקה מדעית וזיקה מתמטית גבוהות. אנו כיתה סקרנית שאוהבת לגלות דברים חדשים.

הכותבים

HADAR BEERI

שני הוריי עוסקים באומנות – אמא בתחום התיאטרון, ואבא בתחומי עיצוב גרפי וציור. בעקבותיהם, רוב חיי עסקתי גם אני באומנות – רקדתי, שרתי וכן עבדתי בתיאטרון כמה שנים לאחר סיום שירותי הצבאי. גם אל התואר הראשון שלי הגעתי דרך אומנות – לאחר שקראתי את הספר 'מונדי דיק' החלטתי שאני רוצה להיות ביולוגית ימית. כשהרומנטיקה של הספר דעכה במהלך שלוש שנות לימודי, הבנתי שאני נמשכת מאוד לתחום המוח וההתנהגות. הצטרפתי לתואר שני במעבדה של פרופ' גוטפרינד לחקר הקשב בתנשמות, וכיום, לאחר כשבע שנים מרתקות במעבדה, אני לקראת סיום לימודי הדוקטורט. *hadar9331@gmail.com

YORAM GUTFREUND

את עבודת הדוקטורט שלי כתבתי לפני 22 שנים, בנושא התנהגותם של תמנונים, ומוחותיהם. לאחר מכן עברתי לארצות הברית במטרה לחקור את מערכות השמיעה והראייה של התנשמת. כיום אני פרופסור



חבר, מכהן כראש המעבדה לחקר התנהגות בעלי חיים בטכניון. במעבדתנו אנו חוקרים תנשמות וציפורים נוספות, ומנסים להבין מה מתרחש במוחותיהן של הציפורים כאשר הן מבצעות החלטות, מגיבות ומנווטות לקינים שלהן. לעיתים שואלים אותי מהי החשיבות בהקנת מוח הציפור? התשובה היא שהמוחות של כל בעלי החיים התפתחו ממקור משותף, לכן מחקר העוסק בהתנהגות ציפורים ומוחותיהן עשוי ללמד אותנו דברים מעניינים וחשובים גם על התנהגות האדם וכיצד המוח האנושי פועל.

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