



גלים של תפיסה

Bhargavi Ram¹, Randolph F. Helfrich^{1,2*}

¹מכון Wills Hellen לחקר המוח, אוניברסיטת קליפורניה, ברקלי, ברקלי, קליפורניה, ארצות הברית
²המחלקה לפסיכולוגיה, אוניברסיטת אוסלו, נורבגיה

אנו חווים את העולם שסביבנו כעולם "רציף", שבו הכל נראה באופן מתמשך וללא הפרעות. אולם כיצד המוח שלכם מבצע זאת? במאמר זה אנו מציעים שהמוח דוגם את הסביבה ב"תמונות" בודדות. אנו מדגימים את העובדה שגלי המוח עובדים כמו ספרון אנימציה (flipbook), כך שהשקף המהיר של תמונות קשורות זו לזו יוצר את האשליה של סרט רציף. אנו מציינים תוצאות מניסויים עכשוויים שמראים כיצד גלי המוח תופסים את העולם שאנו רואים. גלי המוח האלה מתרחשים כ-10 פעמים בשנייה בקירוב, והם נקראים "תנודות אלפא". במאמר זה נספק סקירה של האופן שבו גלי המוח התגלו, כיצד אפשר למדוד אותם, מה המשמעות שלהם וכיצד הם מסייעים לייצר תפיסה של העולם שסביבנו.

גילוי גלי המוח אצל בני אדם

בשנת 1924, פיזיקאי בשם הנס ברגר (Hans Berger) (איור 1A) רשם פעילות חשמלית ממוח אנושי. הוא חיבר אלקטרודות, אשר מדדו פעילות חשמלית, אל ראשיהם של המטופלים שלו, הגביר את האותות שהאלקטרודות מדדו כך שאפשר יהיה לראותם באמצעות ציוד מדעי, וראה עקומות שנראות כמו גלים (איורים 1B,C). זה היה הגילוי של מה שאנו מכנים כיום אלקטרואנצפולוגרם (EEG – Electroencephalogram), ושל הפעילות החשמלית שבמוח שמתבטאת בגלי המוח, אשר נקראת גם **אוסצילציות** (תנודות). לאוסצילציות הכי בולטות, שהתרחשו כ-10 פעמים בשנייה, הוא קרא אוסצילציות אלפא (אלפא היא האות הראשונה

סוקרים צעירים

KRISHNA
גיל: 11



DARIUS
גיל: 13



WYATT
גיל: 10



SCHUYLER
גיל: 11



SYBILLE
גיל: 8

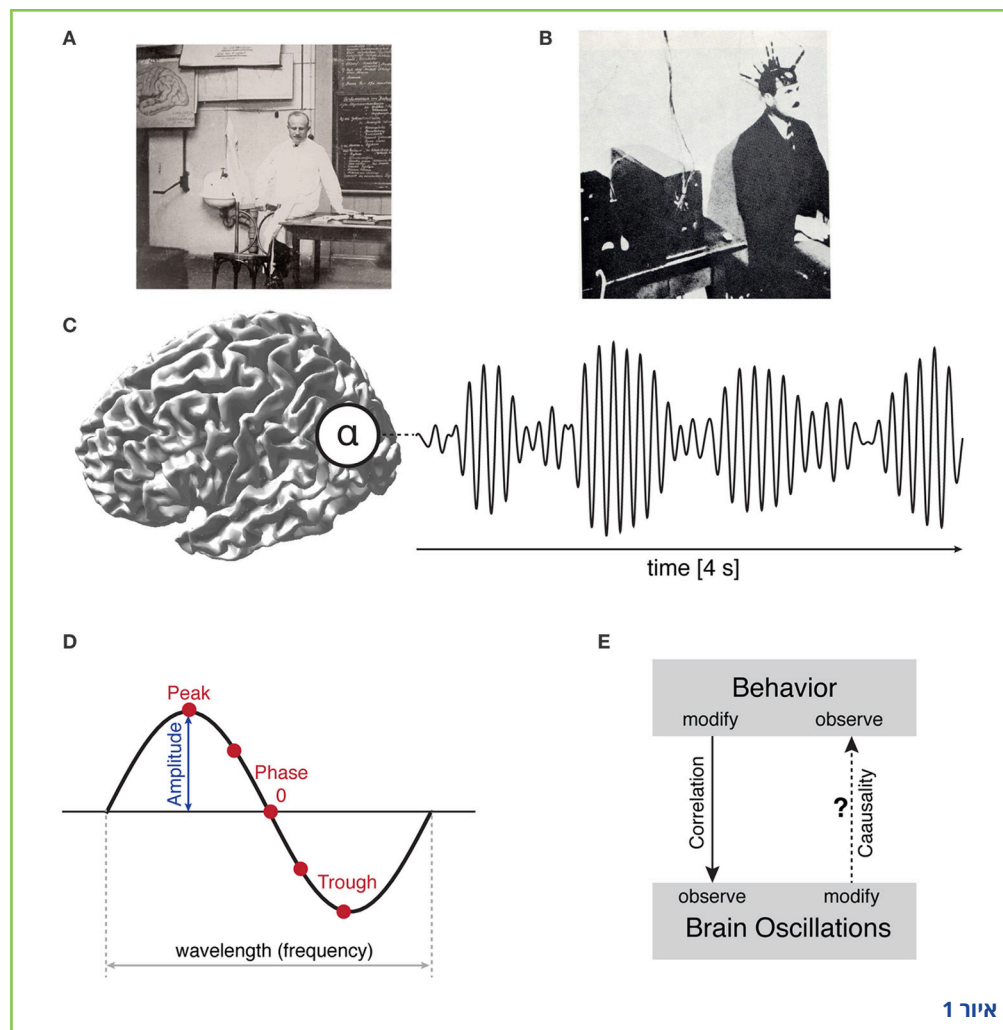


PACEYN
גיל: 7



איור 1

A. הנס ברגר מאוניברסיטת Jena בגרמניה. **B.** אלקטרואנצפלוגרם שרושם פעילות מוחית בשנת 1929. **C.** המחשה של המיקום שבו נוצרים גלי אלפא במוח, וכיצד הם נראים. **D.** תיאור גרפי של גל והמאפיינים המרכזיים של גל. כאן, אנו מראים מחזור אחד של גלי אלפא, שמורכב מ-10 מחזורים קטנים בשנייה. שימו לב שלכל מחזור של הגל יש שיא ושפל, ואנו יכולים למדוד את המשך (גודל) של כל חלק באוסצילציית אלפא. **E.** עד כה, מדענים שינו בעיקר את התפיסה ו/או ההתנהגות של נבדקים, ואז התבוננו בשינויים שבגלי המוח (סוג כזה של הבחנה, שבה רואים ששני דברים קשורים זה לזה, נקרא קורלציה), אולם עכשיו אנו רוצים לעשות את ההיפך: לשנות אוסצילציות מוחיות ולהתבונן כיצד משתנה התנהגות הנבדק.
 שיא = Peak
 משך = Amplitude
 שפל = Trough
 התנהגות = Behavior
 גל = Wavelength
 תדירות = Frequency
 = Brain Oscillations
 אוסצילציות מוחיות



איור 1

אוסצילציות (Oscillations)

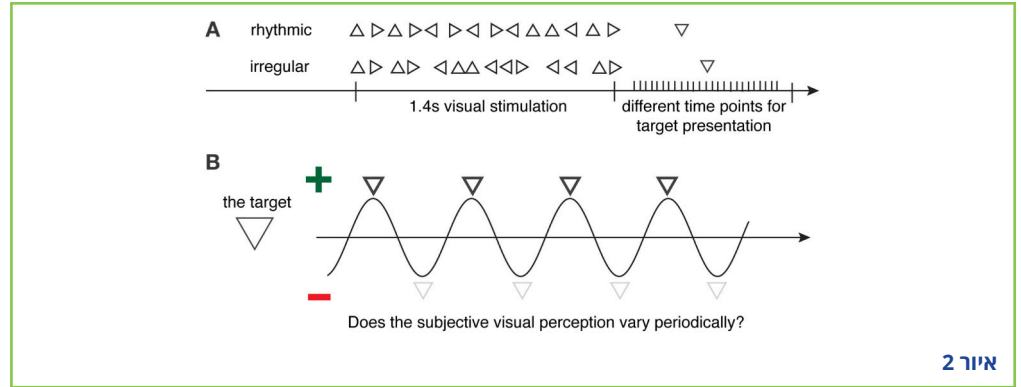
תנודות, מילה נוספת עבור תהליך מחזורי. אנו משתמשים בה כדי לתאר מקצבים שנראים כמו גלים.

באלף-בית היווני). את אוסצילציות האלפא, הנקראות גם גלי אלפא, הכי קל למדוד במערכת הראייה ובאחורי המוח. כאשר ברגר בחן את הלב שלו, הוא הבין לראשונה כי גלי המוח משתנים יחד עם מאמץ מנטלי. במהלך העשורים שלאחר מכן, ניסויים רבים נוספים הדגימו כי גלי מוח מסוימים קשורים לשימוש בחושים שלנו כדי לאתר פריטים בסביבה (ראיית אדם אחר, שמיעת אדם מדבר וכדומה), וכן עם פעולות מוחיות שונות, כמו הפניית קשב או אחסון מידע חשוב בזיכרון [2, 3]. אולם ברגר עדיין לא ידע אם גלי המוח הם רק תוצר לוואי שמתרחש כאשר המוח עובד, או אם גלי המוח מהווים חלק מרכזי מפעילות המוח התקינה.

מהו גל מוח?

אפשר לתאר את גלי המוח ואת התכונות שלהם בעזרת מתמטיקה. באיור 1D אתם יכולים לראות את הצורה של גלי מוח. התדירות, או אורך הגל, מראה כמה פעמים הגל חוזר על עצמו במשך זמן מסוים. המשך מתאר כמה "גבוה" הגל, והפאה של הגל מתארת את המיקום בתוך מחזור הגל בזמנים שונים (האם הוא נמצא בשיא, בשפל או איפשהו בין לבין). הגלים נמדדים במיקרו-וולטים (μV , או מיליונית הוולט). גודלו של גל אלפא טיפוסי הוא כ-20-100 מיקרו-וולטים. גלי המוח מספקים למדענים מושג עד כמה מיליוני תאי העצב שנמצאים מתחת

איור 2



איור 2

A. המשימה: הראינו למשתתפים סרט מהבהב על מסך מחשב, עם רצף קצוב (שורה עליונה) או בלתי סדיר (שורה תחתונה) של משולשים, למשך 1.4 שניות, ואז בחנו את היכולת שלהם לזהות את המשולש שפונה כלפי מטה, שהיה קשה להבחנה (מימין). עשינו את המשימה קשה כל כך, כך שבמוצע המשתתפים יצליחו לענות נכון רק בשלושה מתוך ארבעה ניסיונות. המשתתפים לא ידעו היכן המטרה תהיה מוצגת. היו 25 אפשרויות בסך הכול (קווים שחורים מימין). **B.** הרעיון שלנו היה שאם המטרה תוצג בנקודות זמן שונות, התפיסה לא תהיה זהה בכל נקודה בזמן אלא תשתנה עם פעילות גלי האלפא: אתם יכולים לראות שהמשתתפים ראו את משולש המטרה באופן שונה בנקודות זמן שונות (נראות גבוהה - משולשים אפורים כהים, נראות נמוכה - משולשים באפור בהיר). משמעות הדבר היא שאפילו שהמשולשים המוצגים זהים פיזית בכל נקודת זמן, תפיסתנו אותם משתנה. התפיסה משתנה מאחר שפאזה גל האלפא היא שונה - היא יכולה להיות בשיא, בשפל או ביניהם. כך שינויים קטנים במוח משפיעים על האופן שבו אנו רואים את העולם.

לכל אלקטרודה ניתנים לעירור (הפעלה). ניסויים קודמים הראו כי סוגים מסוימים של גלי מוח קשורים לפעולות מוחיות מסוימות. לדוגמה, פעולת הראייה, שנקראת תפיסה חזותית, מקושרת עם גלי אלפא.

כיצד אנו יכולים לבחון את התפקיד של גלי מוח?

מדענים מִשְׁעֵרִים כי גלי מוח הם לא רק תוצר לוואי של פעולת המוח, אלא שעשויה להיות להם תרומה חשובה לאופן שבו המוח עובד [1]. אם גלי המוח חוזרים על עצמם פעמים רבות בשנייה, האם התפיסה וההתנהגות שלנו משתנות גם הן פעמים רבות בשנייה? [4]. זה מה שאנו רצינו לגלות!

בעבר, מרבית המדענים צפו בהתנהגות מסוימת אצל המטופלים שלהם, בעודם רושמים את פעילות גלי המוח של המטופלים. אחר כך הם בדקו אם ההתנהגות שהם ראו וגלי המוח שהם מדדו, היו קשורים זה לזה בצורה כלשהי. אנו חשבנו שאם נעשה את הניסוי הזה הפוך, נוכל לקבל עוד מידע ואז נוכל לומר בוודאות אם גלי המוח קשורים באופן ישיר להתנהגות של המטופלים. תהינו אם אנו יכולים לשנות את גלי המוח ואז ללמוד כיצד תפיסה והתנהגות פרטנית משתנות ביחס לשינוי בגלי המוח (איור 1E) [1]. בקצרה, האם אנו יכולים ליצור שינוי בהתנהגות באמצעות שינוי בגלי המוח? חשבנו שדרך אחת לראות אם שינויים בגלי המוח יוצרים שינויים בהתנהגות היא להציג חלק מהמידע החזותי למשתתפים באותה התדירות של גלי המוח שרצינו לחקור - במקרה שלנו, גלי אלפא שתדירותם 10 הרץ. הרעיון הוא שגלי המוח יוכלו להצטרף לִמְקָצֵב החיצוני, ממש כמו כשמוחאים כפיים יחד עם פעימות של שיר. באופן הזה אנו יכולים לאמן את המוח לפעול בקצב מסוים. לאחר מכן, אנו יכולים לחקור כיצד ההתנהגות משתנה כשגלי האלפא משתנים.

האם גלי אלפא קשורים לתפיסה חזותית?

עבור הניסוי שלנו, גייסנו 20 משתתפים בריאים בגילאי 18-29 [5]. הראינו למשתתפים סרט מהיר מאוד על מסך המחשב. הסרט כלל 14 משולשים בכיוונים שונים (משולשים שמצביעים למעלה, ימינה או שמאלה) במרכזו של מסך שחור (איור 2A).

המשולשים האלה מהבהבים בקצב קבוע, או בקצב בלתי סדיר. בקצב הקבוע, כל משולש מוצג על המסך במשך 17 מילישניות (ms, אלפית השנייה), עם מרווח של 83 מילישניות ביניהם. הסיבה שבחרנו במרווח הזה היא ש: $100 = 17 + 83$ מילישניות, כלומר סך הכול 10 חזרות בשנייה – אותו הקצב של גלי אלפא בתדירות 10 הרץ שאנו מעוניינים לחקור! הקצב הבלתי סדיר לא היה מתואם עם התזמון הזה. גם הסרטים עם המקצב היציב וגם אלה עם המקצב הבלתי סדיר היו באורך של 1.4 שניות. כל המשתתפים ראו 400 סרטים – 200 עם תבנית הבהוב קבועה ו-200 עם תבנית הבהוב בלתי סדירה. שלושת המשולשים האחרונים בכל ניסיון היו תמיד באותה התבנית (מצביעים שמאלה – למעלה – ימינה). תבנית זו סימנה למשתתפים שהמטרה (המשולש שמצביע כלפי מטה) עומדת להופיע, והמשתתפים היו צריכים ללחוץ על כפתור כשהם ראו את משולש המטרה. המשולש שפונה כלפי מטה הוצג לאחר עיכוב של בין 24 ל-850 מילישניות, בקפיצות של 34 מילישניות, אחרי שהבהוב הסתיים (כלומר 34, 68, 102 וכולי, עד 850 מילישניות), כך שיכולנו למדוד את הביצועים של המשתתפים ב-25 נקודות זמן שונות. על-ידי כך ששמרנו את כל תנאי הניסוי זהים עבור כל המשתתפים, שֶׁעָרְנוּ שהניסוי הזה יאמר לנו כיצד איתור המטרה משתנה מרגע לרגע במהלך 850 המילישניות (איור 2B).

התפיסה שלנו אינה רציפה אלא משתנה עם הזמן

ראשית, ניתחנו באיזו תדירות המשתתפים לחצו על הכפתור הנכון שמעיד על כך שהם ראו את המטרה. הביצוע הממוצע עבור תנאי הבהוב היה של 75.1% הצלחה, עם סטיית תקן של 11.04%. הביצוע הממוצע עבור הבהוב בלתי סדיר היה של 74.38% הצלחה, עם סטיית תקן של 12.37%. סטיית התקן אומרת לנו כמה שונות הייתה בין המשתתפים. כפי שאתם יכולים לראות, ערכי הביצועים שראינו עבור שני התנאים היו דומים מאוד, ולא ממש השתנו בין שני התנאים. במילים אחרות, היכולת של המשתתפים לאתר את המטרה הייתה זהה, ללא תלות בשאלה אם הרצף הוצג באופן קבוע או בלתי סדיר.

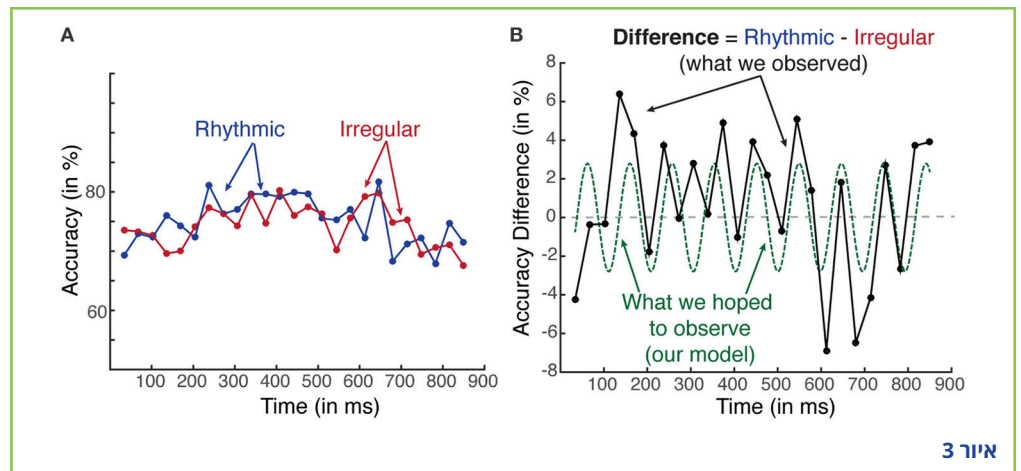
לאחר מכן, הסתכלנו על ביצועים של איתור מטרה לאורך הזמן, עבור 25 זמני הופעה שונים בין המטרה לבין הסרט (איור 3A). כפי שאתם יכולים לראות, כשהסתכלנו על הנתונים באופן הזה, ראינו שהדיוק של איתור המטרה אינו זהה בין שני התנאים, והוא גם משתנה מרגע לרגע. כדי להדגיש את ההבדל שבין התנאי הקצוב והתנאי הבלתי סדיר, החסרנו את הבלתי סדיר מהקצוב במטרה להסיר השפעות משותפות (איור 3B). עכשיו אתם יכולים לראות שההבדל גדל וקטן עם הזמן. מאחר שהסתכלנו על הבדלים בין שני תנאים, אנו עדיין רואים ערכים חיוביים ושליליים. ההבדל הזה נראה כמו אוסצילציית גל האלפא, אשר מוצגת בקו ירוק מקווקו באיור 3B משמעות הדבר היא שההבדל בין תהליכים קצובים ובלתי סדירים נראה בדיוק כמו התהליך המוחי שאותו אנו בוחנים. מעניין!

מה למדנו על המוח?

במחקר הזה, בחנו כיצד סוג של גלי מוח שנקרא אוסצילציות אלפא קשור לתפיסה החזותית האנושית. הראינו שתפיסה חזותית אינה זהה בנקודות זמן שונות, אפילו שאנו תופסים את העולם סביבנו ללא פערים בזמן. מעניין אף יותר לשים לב לכך שהשינוי בתפיסה החזותית נראה כמו גלי מוח. זה אומר לנו שתהליך מוחי מְשַׁנֵּה את התפיסה שלנו את העולם בכל 100

איור 3

A. אם משווים את רמת הדיוק לאורך הזמן, רואים שבכל נקודת זמן יש ערכים שונים. **B.** לאחר מכן ניתחנו את ההבדל (ההפרש בין העקומות הכחולה והאדומה) בין תנאים קצובים ובלתי סדירים (קו שחור), אשר גדלים וקטנים סביב ל-0. ההבדל הזה יכול להיות מתואר בקלות על-ידי גל – בתדירות של אוסצילציות אלפא. באופן מעניין, כעת אנו יכולים לראות כיצד תהליך מוחי משפיע על התנהגות.



איור 3

בְּדִיד

(Discrete)

מתאר תהליך שמורכב מאירועים נפרדים.

רְצִיף

(Continuous)

מתאר תהליך שאיננו מופרע. ההיפך מבדיד.

מילישניות – ואנו לחלוטין לא מודעים להשפעה הזו! אולם אנו יכולים להראות, באמצעות ניסויים, שההשפעה הזו קיימת. אנו קוראים לתפיסה מסוג זה "בְּדִידה", כאשר ממש כמו בספרון אנימציה (flipbook) המוח שלנו דוגם תמונות בודדות אשר מחוברות לסרט זורם אחד.

אולם אם המוח שלנו למעשה רואה דברים שונים בדרך שהיא בדידה, מדוע אנו רואים דברים באופן רציף, ללא הפסקות קטנות בין תמונות שונות? זה כוחו של המוח האנושי לחבר הכול יחד, אך למעשה איננו יודעים עדיין בדיוק מהם המנגנונים שעושים זאת. עבודה בצעדים בדידים היא יעילה יותר אנרגטית עבור המוח. בדיוק כפי שקורה כשאתם צריכים לסחוב משקל כבד. קשה לסחוב אותו כל הדרך, אך קל יותר לסחוב אותו כמה צעדים, לקחת הפסקה ואז להתקדם כמה צעדים נוספים. המוח משתמש באותו המנגנון – בראייה, במגע או בשמיעה, אך הוא עושה זאת מהר מאוד, כך שאיננו שמים לב לכך כלל!

המוח ומקצבים

המוח כפייתי לגבי מקצבים – זה גם מסביר מדוע אנשים, מבוגרים וילדים מכל העולם, אוהבים מוזיקה שהיא בעלת מרכיב קצבי חזק. מוזיקה מפעילה גם את המערכת התנועתית שלנו: זו הסיבה שמרבית האנשים אוהבים לרקוד או לנגן בכלי נגינה בתזמורת. אך המוחות שלנו גם טובים מאוד במקצבים שאינם בדיוק קצביים: לדוגמה, לדיבור יש קצב שמשתנה מעט כתלות בקו שאתם רוצים לומר. לשפות שונות יש מקצבים שונים ותחושות שונות שמתלוות אליהם. אולם קצב הדיבור מסייע למוח לצפות מה הדבר הסביר ביותר שעומד לקרות, כך שהמוח יכול לכוון את המשאבים שלו כדי להבין מה קורה. מחקרים עתידיים יצטרכו לחקור כיצד המוח מחבר את כל התמונות החושיות הבדידות האלה, כך שאנו תופסים את העולם כרציף ולא כמקוטע!

תודות

עבודה זו נתמכה על-ידי קרן Alexander von Humboldt (Feodor Lynen Program,) (RFH).

מאמר המקור

Helfrich, R. F., Huang, M., Wilson, G., and Knight, R. T. 2017. Prefrontal cortex modulates posterior alpha oscillations during top-down guided visual perception. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 114:9457–62. doi: 10.1073/pnas.1705965114

מקורות

1. Herrmann, C. S., Strüber, D., Helfrich, R. F., and Engel, A. K. 2016. EEG oscillations: from correlation to causality. *Int. J. Psychophysiol.* 103:12–21. doi: 10.1016/j.ijpsycho.2015.02.003
2. Klimesch, W. 2012. α -band oscillations, attention, and controlled access to stored information. *Trends Cogn. Sci.* 16:606–17. doi: 10.1016/j.tics.2012.10.007
3. Johnson, E. L., and Helfrich, R. F. 2016. How brain cells make memories. *Front. Young Minds* 4:5. doi: 10.3389/frym.2016.00005
4. VanRullen, R. 2016. Perceptual cycles. *Trends Cogn. Sci.* doi: 10.1016/j.tics.2016.07.006
5. Helfrich, R. F., Huang, M., Wilson, G., and Knight, R. T. 2017. Prefrontal cortex modulates posterior alpha oscillations during top-down guided visual perception. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 114(35):9457–62. doi: 10.1073/pnas.1705965114

פורסם אונליין: 08 בפברואר 2019

נערך על ידי: Robert T. Knight, University of California, Berkeley, United States

ציטוט: Ram B and Helfrich RF (2019) גלים של תפיסה. *Front. Young Minds.* doi: 10.3389/frym.2017.00049-he

תורגם והותאם:

Ram B and Helfrich RF (2017) Waves of Perception. *Front. Young Minds* 5:49. doi: 10.3389/frym.2017.00049

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

© 2017 Ram and Helfrich. 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

11 גיל: KRISHNA

אני אוהב מדע וספורט. אני משחק בייסבול ומתאמן בקונג פו. אני אוהב לעשות ניסויים ולהבין כיצד המדע פועל. במדע - אני נהנה מחלל/אסטרונומיה ומפיזיקה. אני אוהב לקרוא הרבה, ומקווה לכתוב הרבה ספרים לילדים (כבר התחלתי שלושה ספרים). בחיים שלי אני רוצה להמציא משהו חדש ולהקפיד מחדש משהו שנכחד - באמצעות מחקר דנ"א.



13 גיל: DARIUS

אני תלמיד כיתה ה'. בזמני הפנוי אני נהנה לקרוא ולתכנת במחשב. בתור תחביב, אני מבצע ניסויים מועילים עם מכשירים. אני מתעניין מאוד בסביבה, והייתי אחד מהמקימים של הוועדה הירוקה בבית הספר שלי. אני נהנה לקרוא על מדע, בפרט על כימיה, ביולוגיה וחקר המוח.



10 גיל: WYATT

אני תלמיד כיתה ד ב- Piedmont שבקליפורניה, ארצות הברית. אני אוהב לקרוא, לשחק בלגו, לשחק במinecraft, לאכול ולישון! אני גם אוהב לרכוב על קורקינט ואופניים, לטפס ולבנות דברים. האוכל האהוב עלי הוא אתיופי - אני אוהב את כל הדגים המטוגנים ואת ה-doro tibs. המקצועות האהובים עלי בבית הספר כרגע הם מעבדת מחשבים, חינוך גופני, ספרייה ומדע. אני מצפה ללמוד כימיה כשאגיע לחטיבת הביניים! אחרי הקולג', אני רוצה להיות מהנדס מכונות ומתכנת רובוטיקה.



11 גיל: SCHUYLER

אני Schuyler. אני גרה בברקלי, קליפורניה, ארצות הברית. אני בת 11 ולומדת בכיתה ז. המקצועות האהובים עלי בבית הספר הם כתיבה ומדע. אני אוהבת לכתוב קטעי מדע בדיוני, ואני גם אוהבת לשיר, לשחק ולבשל. הדמות שאני מעריצה ושמעוררת בי השראה היא אימא שלי. אני גם משחקת כדורגל ובייסבול.



8 גיל: SYBILLE

קוראים לי Sybille. אני בת 8, ואני תלמידת כיתה ד ב-Malcolm X. אני גרה בברקלי, קליפורניה, ארצות הברית, ואני משחקת כדורגל. אני אוהבת לעשות ניסויים מדעיים מטופשים ולבשל, ואני טובה מאוד במתמטיקה.



7 גיל: PACEYN

אני Paceyn. אני בת 7 ואני תלמידת כיתה ב בבית ספר יסודי Leconte בתוכנית TWI Spanish. המקצועות האהובים עלי בבית הספר הם קריאה, כתיבה ומתמטיקה. אני אוהבת לערוך ניסויים מדעיים, לעסוק באומנות ולכתוב סיפורים, ובמיוחד שירים. אני אוספת אבנים וחיות מפוחלצות, ואני אוהבת סקי ומוג אוויר קר. אני נהנית מהתעמלות קרקע, ריקוד ועידוד, ויש לי חזירת ים ששמה לוֹנָה.



הכותבים

BHARGAVI RAM

Bhagravi היא חברת ה-Young Mind הראשונה שלנו שעוברת מלהיות סוקרת צעירה מוערכת לכותבת של מאמר. אנו בטוחים שהיא לא תהיה האחרונה. אני בת 17, ואני הולכת ללמוד חקר המוח ופסיכולוגיה באוניברסיטת UC San Diego. אני אוהבת לקרוא, להאזין למוזיקה ולצפות בבייסבול (Go Warriors!), ויש לי תשוקה ל-Bharathanatyam – ריקוד קלאסי עתיק. מגיל צעיר, השאיפה שלי הייתה להיות מנתחת מוח מקצועית של ילדים, ומשם מגיע העניין שלי בחקר המוח ובמוח. יש לי גם שאיפה סודית (אולי כבר לא כל כך סודית) להיות מנתח טלוויזיה. באופן עקרוני, אני רוצה להטביע חותם מתמשך בעולם.

RANDOLPH F. HELFRICH

אני רופא וחוקר מוח. עבורי, מרתק כיצד תקשורת בין מיליארדי תאים במוח שלנו מייצגת קוגניציה והתנהגות. לכן, אני רוצה להבין כיצד תאי עצב מתקשרים ומדוע המוח האנושי מיוחד כל כך. כשאינני במעבדה, אני נהנה לטייל ולנגן בגיטרה או בפסנתר. *rhelfrich@berkeley.edu



Hebrew version
provided by

[מוזיאון המדע ע"ש בלומפילד ירושלים \(ער.\)](#)
[متحف العلوم على اسم بلومفيلد القدس](#)
Bloomfield Science Museum Jerusalem

