

## לא מרוכזים? ייתכן שהקלאוסטרום שלכם אשם

Yonatan Fatal<sup>1,2</sup>, Ami Citri<sup>1,3,4\*</sup>

<sup>1</sup>מרכז אדמונד וילי ספרא למדעי המוח, האוניברסיטה העברית בירושלים

<sup>2</sup>האוניברסיטה הפתוחה, רעננה

<sup>3</sup>המכון למדעי החיים, האוניברסיטה העברית בירושלים

<sup>4</sup>התוכנית לחקר התפתחות הילד והמוח, המכון הקנדי למחקר מתקדם, טורונטו, קנדה

### סוקרים צעירים

NOAR  
SHOHER  
MADA TAU  
(SCIENCE-  
ORIENTED-  
YOUTH)  
גיל: 12-16



כדי להצליח לקרוא את המשפטים האלה, מוחכם צריך להתעלם ממגוון של הסחות דעת – מראות, צלילים וריחות. עמידות להסחות דעת היא יכולת חיונית לחיי היום-יום שלנו, והיא מהווה אתגר מיוחד לאנשים שמתמודדים עם הפרעות קשב. במאמר שפרסמנו לאחרונה, שאלנו האם אזור חידתי במוח, שנקרא הקלאוסטרום, מסייע בעמידות בפני הסחות דעת. לצורך כך, פיתחנו שיטות שאפשרו לנו להשתיק באופן ממוקד את הקלאוסטרום בעכברים. לאחר מכן, העמדנו את העכברים בפני משימות הדורשות קשב. מצאנו שעכברים אשר הקלאוסטרום שלהם הושתק היו רגישים במיוחד להסחות דעת. תוצאות אלה מספקות רמז חשוב בנוגע לתפקודו של הקלאוסטרום, ואנו מקווים שהן יתרמו לפיתוח שיטות חדשות שיוכלו לסייע לאנשים המתמודדים עם הפרעות קשב.

בזמן קריאת המילים האלה, אתם מקדישים תשומת לב לאותיות השחורות על הדף הלבן. כדי לעשות זאת, מוחכם צריך להתעלם ממגוון של עצמים וגירויים אחרים סביב. הוא נדרש "לשים בצד" חלקים גדולים מתוך מה שאתם רואים, למשל קירות ביתכם, או מקשי המקלדת. מוחכם צריך גם לסנן קולות מסביבתכם, ולהתעלם ממנח גופכם על הכיסא. דמיינו לרגע מה היה

קורה אילו מוחכם לא היה מבדיל בין מידע חשוב להסחת דעת. אם הכול היה חשוב, האם הייתם מסוגלים **להתרכז?**

במילים אחרות, כדי לשמור על קשב, מוחנו צריך לבצע כל הזמן שתי פעולות משלימות [1]:

- (1) להדגיש מידע חשוב ורלוונטי.
- (2) להזניח מידע פחות חשוב, שאינו רלוונטי.

היכולת הזו, להתרכז ולהתעלם מהסחות דעת, פגועה ואינה מתפקדת היטב אצל אנשים עם **הפרעות קשב**. בהפרעת קשב יש פעמים רבות קושי בהפרדה בין האירועים החשובים בעולם, ובין אלה שהם בעדיפות נמוכה יותר, ואשר כרגע, בזמן ביצוע משימה, אפשר להתעלם מהם.

איך כל זה קשור למוח?

אף על פי שמוחנו הוא איבר אחד, ניתן להגדיר כ-1,000 תתי-אזורים במוח. כל אחד מהם תורם יכולות ייחודיות שמשיערות לתפקודים השונים של המוח: עיבוד של מידע מהחושים, שימור זיכרונות, הכוננת המחשבות ושליחת פקודות לשרירי הגוף. באו נניח שיש אזור במוח שמתמחה בהשתקה של מידע בלתי רלוונטי וסינונו. אלה תכונות הייתם מצפים שיהיו לאזור הזה?

## הקלאוסטרום - אזור חידתי במוח

אזור במוח שמסנן מידע לא חשוב אמור ודאי לקבל מידע מאזורים במוח שאחראים על חושים שונים, כדי לדעת מה לסנן החוצה. זאת ועוד, הוא צריך לתקשר עם אזורים במוח שמכוונים את הקשב שלנו. אזור אחד במוח שעונה לדרישות האלה הוא **הקלאוסטרום**. זהו אזור מסקרן, שמתקשר עם אזורים רבים אחרים, ומתעדכן בכל המידע החושי הזמין למוח (מידע על מראות, צלילים, ריחות ועוד) [2, 3]. אף שהקלאוסטרום הוא אזור קטן יחסית במוח, הוא אחד מהמקושרים ביותר ביחס לגודלו [4].

כפי שניתן לראות באיור 1, הקלאוסטרום נמצא עמוק במוח, והוא בעל צורה של יריעה דקה וארוכה. שמו תואם את מיקומו במוח - משמעות המילה "קלאוסטרום" בלטינית היא חבוי או סגור, בדומה לקלאוסטרופוביה (פחד ממקומות סגורים וצפופים). הקלאוסטרום משך את תשומת ליבם של חוקרים, אשר מאז גילויו הסתקרנו לגבי ייעודו של אזור זה במוח. באותה המידה הוא גם תסַּכֵּל את החוקרים, משום שהם לא הצליחו לזהות שיטה שבה יוכלו להבין מה תפקידו. כדי להבין מה התפקיד של אזור במוח, חוקרים נוהגים לפגוע בפעילות התקינה שלו, במטרה לזהות אלה יכולות נפגעו. זה היה כמעט בלתי אפשרי עבור הקלאוסטרום, בגלל הממדים הקטנים שלו, מיקומו המאתגר וצורתו הבלתי שגרתית. זה היה המצב עד שגל אטלן, אנה טרם ועמיתיהם - חוקרים במעבדה של פרופסור ציתרי באוניברסיטה העברית בירושלים - מצאו דרך להשתיק באופן ממוקד תאים בקלאוסטרום [5].

### הפרעות קשב (Attention disorders)

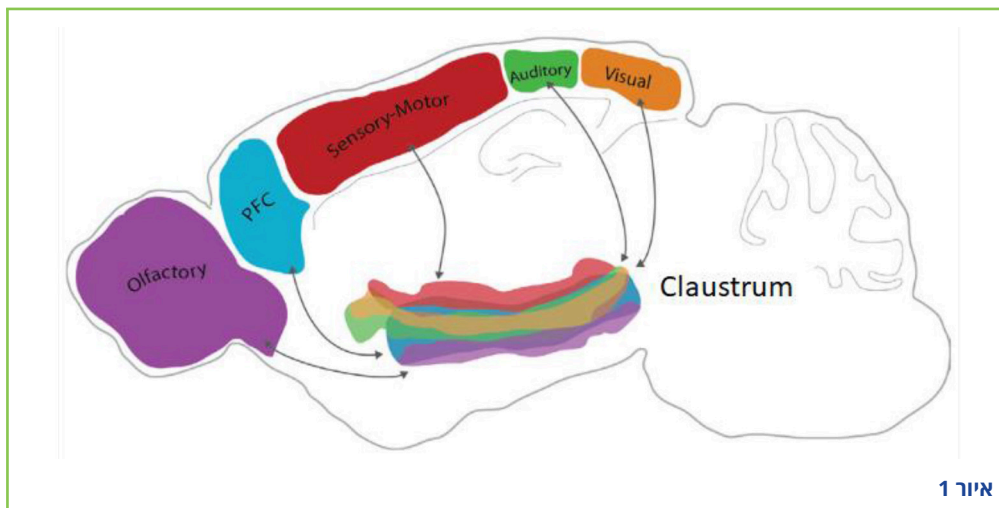
הפרעה מוחית שמובילה לשורה של אתגרים התנהגותיים כמו קושי לעקוב אחר הוראות, קושי להתמקד לאורך זמן בביצוע מטלות ואי-הצלחה בסיום משימות ביעילות. אנשים עם הפרעות קשב נוטים להיות מוסחי דעת בקלות.

### קלאוסטרום (Claustrum)

אזור דק ומאורך הממוקם עמוק בתוך המוח, אשר מקיים אינטראקציה עם אזורי מוח רבים אחרים, המעורבים בתפקודים מוחיים מרובים.

### איור 1

קשרים בין הקלאוסטרומ לאזורים שונים בקליפת המוח. מבט מהצד על מוח של מכרסמים. הקלאוסטרומ (צבעוני באמצע) מתקשר עם מגוון אזורים שאחראים לעיבוד של מה שאנו רואים (Visual, בכתום), שומעים (Auditory, בירוק), ממששים (Sensory-Motor, באדום) ומריחים (Olfactory, בסגול). הקלאוסטרומ מתקשר באופן הדדי גם עם אזורים שאחראים על הכוונת הקשב שלנו ושולטים בהתנהגות. הם נמצאים בחלק הקדמי של קליפת המוח – Prefrontal Cortex, ובקיצור PFC. מתוך: [2].



איור 1

## איך משתיקים את הקלאוסטרומ?

כדי להבין איך גל ואנה הצליחו להתמודד עם האתגר שתיארנו, ולהשתיק את הקלאוסטרומ, אנו צריכים להבין מאפיין יסודי של תאים. גופנו מורכב ממספר עצום ובלתי נתפס של תאים – כמאה מיליארד! כל התאים שלנו חולקים את אותו "קוד" - הדנ"א - שאחראי להגדרת פעולה מרכזית המבוצעת על ידי תאים, ייצור חלבונים. ניתן לדמין חלבונים כמכונות קטנות, אשר לכל אחת מהן יש תפקיד ייחודי. תאים בגופנו נבדלים בכך שהם מייצרים חלבונים שונים, שמאפשרים להם לבצע תפקידים שונים. המוגלובין, למשל, הוא חלבון נושא חמצן, אשר מצוי בתאי דם אדומים.

קבוצת המחקר של פרופסור ציתרי גילתה שתאי עצב בקלאוסטרומ מייצרים חלבון בשם **Egr2**. החלבון הזה מבדיל בין תאים בקלאוסטרומ לבין תאים באזורים אחרים שסמוכים אליו, ולכן נקרא "סמן של תאים בקלאוסטרומ". התגלית הזו אפשרה לחוקרים להשתמש בעכברים, כבעלי חיים מהונדסים גנטית (טרנסגניים), כדי להשפיע רק על תאים שמבטאים את החלבון Egr2. כחלק מהתהליך החוקרים הנדסו עכברים אלה כך שכל התאים בגופם שמייצרים Egr2 ייצרו גם חלבון מסוים. בשלב הבא החדירו החוקרים לאזור הקלאוסטרומ **וירוס**, אשר החלבון הנוסף שייצרו העכברים מאפשר לו להתבטא, והוא מהונדס כך שישתיק רק תאים שמייצרים Egr2. היכולת להשתיק תאי עצב בקלאוסטרומ בצורה סלקטיבית (ממוקדת), אפשרה לחוקרים, בפעם הראשונה, לבחון את תפקידו של הקלאוסטרומ.

## קלאוסטרומ - המגן שלנו מפני הסחות דעת

עד כה במאמר, למדנו על המיקום של הקלאוסטרומ והקישוריות שלו, כמו גם על שיטה שמאפשרת השתקה של פעילותו. עכשיו אנו יכולים לשאול - האם הקלאוסטרומ קשור לקשב? האם הוא עוזר לנו להיות מרוכזים ולהישאר עמידים להסחות דעת?

כדי לענות על השאלות האלה, גל ואנה, עם נועה פרץ-ריבלין, ביצעו את הניסוי הבא. עכברים חיו בכלוב שהיה מחובר לשני מקורות מים (איור 2A). כאשר עכבר ניגש למקורות המים האלה, הופיע לרגע קצר אור מעל אחד המקורות. העכבר היה צריך לשים לב לאור ולהגיב במהירות

### חלבונים (Proteins)

המכונות ואבני הבניין הקטנטנות של הטבע. חלבונים מייצרים אנרגיה מהמזון, מאפשרים לנו להזיז את השרירים שלנו, והם חיוניים לכמעט כל הפעולות שהתאים שלנו מבצעים.

### Egr2 (Early Growth Response 2)

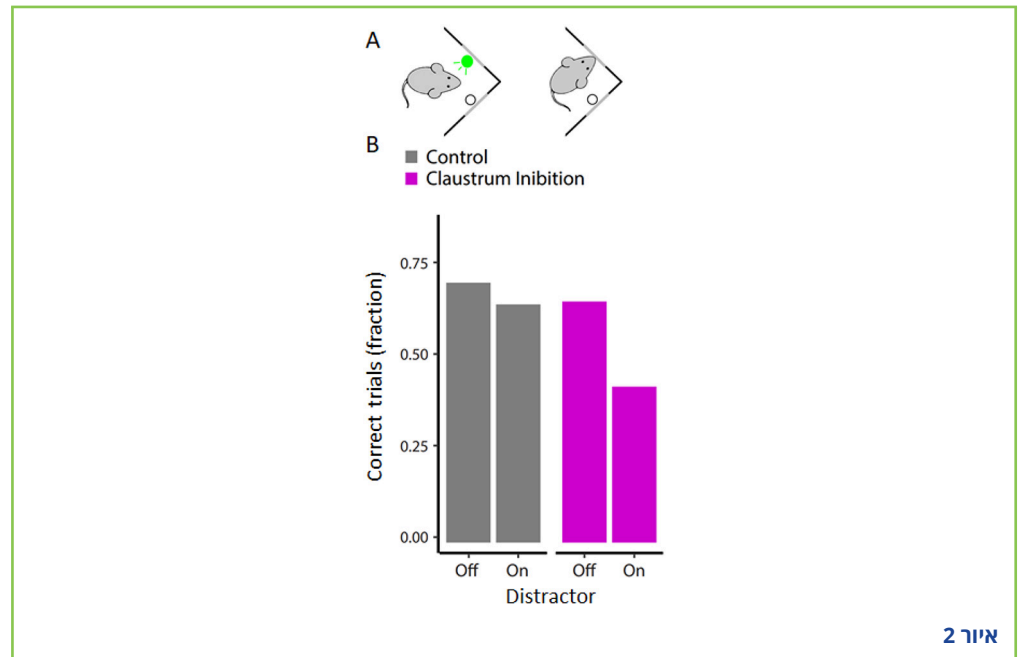
זהו סוג מיוחד של חלבון השולט בייצור חלבונים רבים אחרים. Egr2 מיוצר בקלאוסטרומ, אך לא באזורים שכנים, מה שהופך אותו לסמן טוב עבור הקלאוסטרומ.

### וירוס (Virus)

מקטע קצר של חומר תורשתי (DNA או RNA), המוקף במעטפת חלבונית. ניתן כיום לייצר וירוסים מהונדסים גנטית במעבדה, כדי להדביק תאים ספציפיים באורגניזם.

## איור 2

השתקה של הקלאוסטרם גורמת לעכברים להיות רגישים להסחות דעת. (A) תיאור המשימה: כאשר העכבר ניגש למקורות המים, נדלק אור מעל אחד המקורות. לעכבר יש פרק זמן קצוב ללקק את מקור המים המואר. ליקוק בזמן המתאים ובמקור המים המתאים נחשב כ"הצלחה". בחלק מהפעמים, מושמע רעש בעת הדלקת האור. הרעש נועד להסיח את דעתם של העכברים. (B) גרף שמתאר את שיעור ההצלחות מתוך כלל הניסיונות בארבעה מצבים: (1) קבוצת הביקורת (קלאוסטרם תקין) ללא רעש - שיעור ההצלחה גבוה, בערך 65%; (2) קבוצת הביקורת בניסיונות שבהם הושמע רעש - שיעור ההצלחה נשאר דומה; (3) קבוצת הניסוי (קלאוסטרם מושחק) ללא רעש - שיעור ההצלחה דומה לקבוצת הביקורת ללא רעש; (4) קבוצת הניסוי בניסיונות שבהם הושמע רעש - שיעור ההצלחה ירד משמעותית, ועומד על כ-40%.



איור 2

על ידי ליקוק של חיישן, כדי לקבל טיפה של מים. בחלק מהמקרים, נשמע רעש בזמן שהאור נדלק, ששימש כהסחת דעת. הביצועים של העכברים במשימה נמדדו כאחוז הפעמים שהם קיבלו טיפה, כלומר ליקקו את המיקום המתאים, מתוך כל ניסיונותיהם.

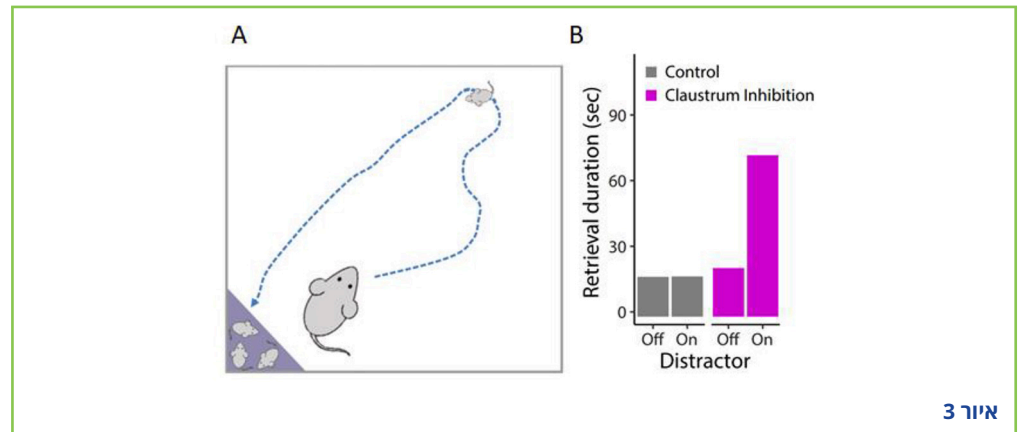
החוקרים השוו בין עכברים שהקלאוסטרם שלהם היה מושחק ובין עכברי ביקורת, בעלי קלאוסטרם תקין. הם שמו לב לדפוס מעניין: בהיעדר הסחת דעת, שתי קבוצות העכברים הגיעו לביצועים דומים - שתיהן הצליחו בערך 65% מהפעמים. לעומת זאת כאשר הייתה הסחת דעת, שיעור ההצלחות של עכברים שהקלאוסטרם שלהם הושחק ירד מ-65% ל-40%. קבוצת הביקורת לא הושפעה מהסחת הדעת (איור 2B).

תוצאות הניסוי הזה מלמדות אותנו שפעילות תקינה של הקלאוסטרם היא חיונית כדי שעכברים יוכלו להתעלם מהסחות דעת. חשוב להדגיש שמדובר בניסוי מלאכותי מאוד - עכברים בטבע לא צריכים ללקק מקור מים שמסומן באור כדי לקבל טיפת מים. במטרה לבחון את התפקיד של הקלאוסטרם בסביבה טבעית יותר, גל ואנה ביצעו ניסוי נוסף עם עכברות אימהות וגוריהן. אימהות בטבע, לא דווקא עכברות, נוהגות לעקוב אחר המיקום של הגורים שלהן באמצעות מרבית החושים - ראייה, ריח ושמיעה - ולאסוף את הגורים חזרה לקן אם הם מתרחקים. קחו לדוגמה מצב שבו אתם אחראים על האחים הצעירים שלכם בקניון או בקולנוע. האם אתם יכולים להרשות לעצמכם להיות מוסחי דעת ולא לשים לב אליהם?

גל ואנה ביקשו לראות אם העכברות האימהות תלויות בקלאוסטרם שלהן כדי לבצע החזרה של גור לקן בנוכחות של הסחת דעת. לצורך כך, הם לקחו גורים צעירים ומיקמו אותם בזה אחר זה בקופסה, מרחק קצר מהאם (איור 3A). הם השוו את הזמן שלקח לאימהות רגילות להחזיר את הגורים לקן, לעומת אימהות שהקלאוסטרם שלהן הושחק. בדומה לניסוי הקודם, בחלק מהמקרים הם כללו רעש כהסחת דעת. כפי שניתן לראות באיור 3B, הסחת הדעת לא השפיעה על הביצועים של אימהות בקבוצת הביקורת. לעומת זאת הייתה לה השפעה

### איור 3

השתקה של הקלאוסטרום מעלה את הרגישות של אימהות להסחות דעת בזמן החזרה של גורים לקן. (A) תיאור המשימה: החוקרים מיקמו את הגור במרחק מסוים מהאם, ומדדו את הזמן (בשניות) אשר לקח לה לגשת אליו ולהחזיר אותו לקן. (B) גרף המסכם את תוצאות הניסוי, מתאר את הזמן (בשניות) הממוצע שנדרש לאימהות כדי להחזיר את הגורים לקן, בארבעה מצבים: (1) עכברי ביקורת (קלאוסטרום תקין) ללא רעש - הזמן הממוצע הוא כ-15 שניות; (2) עכברי ביקורת עם רעש שמשמש כהסחת דעת - הזמן הממוצע נותר נמוך; (3) עכברי ניסוי (קלאוסטרום מושחק) ללא רעש - הזמן הממוצע דומה לקבוצת הביקורת, כ-20 שניות; (4) עכברי ניסוי בנוכחות רעש - הזמן הממוצע עלה משמעותית. לאימהות לקח יותר מדקה להחזיר את הגורים לקן.



איור 3

דרמטית על האימהות שהקלאוסטרום שלהן הושחק. הזמן הממוצע שלקח להן להחזיר את הגורים עלה מ-20 שניות ליותר מדקה.

### סיכום

כדי לשמור על קשב, מוחנו צריך לסנן כמות אדירה של מידע לא רלוונטי. קבוצת המחקר שלנו העלתה את ההשערה שהקלאוסטרום יכול להיות מועמד טוב לביצוע המשימה הזו. לצורך בחינת ההשערה, החוקרים השתמשו בכלים גנטיים כדי להשתיק את הקלאוסטרום, ולהשוות בין עכברים עם קלאוסטרום מושחק לעכברים בעלי קלאוסטרום שמתפקד באופן טבעי. במצבים שבהם לא הייתה הסחת דעת, לא היו הבדלים בין הקבוצות. לעומת זאת בנוכחות הסחת הדעת, הייתה ירידה בתפקוד של העכברים שהקלאוסטרום שלהם הושחק.

האם המידע שלמדנו בעכברים יכול לסייע לנו להבין מה התפקוד של הקלאוסטרום בבני אדם? באופן כללי, כן. מידע מעכברים מספק לנו כיוון טוב לגבי התפקוד של אזורי מוח שונים בבני אדם. יש דמיון רב במבנה המוח של עכבר ושל אדם, בחלוקה לאזורים ואפילו בקשרים והחיבורים בין אזורים. לצורך העניין, כאשר אמרנו שהקלאוסטרום הוא האזור המקושר ביותר במוח ביחס לגודלו, ציטטנו מחקר שבוצע בבני אדם [4]. בעכברים ראיתם תמונה דומה (כפי שניתן להתרשם מאיור 1, המבוסס על מאמר [2]).

המחקר מעלה שורת שאלות מעניינות. בעולם מלא בהסחות דעת, האם אנו יכולים לגרום לקלאוסטרום לעבוד קשה מהרגיל ולשפר את הקשב שלנו? איך הקלאוסטרום יודע איזה מידע הוא חשוב ומה צריך לסנן? מה בדיוק הקלאוסטרום עושה כדי לעזור לנו לסנן מידע בלתי רלוונטי? מהם התפקידים האחרים של הקלאוסטרום? ולבסוף - האם ניתן להשתמש בידע שצברנו כדי לסייע לאנשים המתמודדים עם הפרעות קשב?

המחקר שאנו מבצעים כרגע במעבדה מכוון לענות על מכלול השאלות האלה.

### מאמר המקור

Atlan, G., Terem, A., Peretz-Rivlin, N., Sehrawat, K., Gonzales, B. J., Pozner, G., et al. 2018. The claustrum supports resilience to distraction. *Curr. Biol.* 28:2752-62. doi: 10.1016/j.cub.2018.06.068

## מקורות

1. Mangun, G. 2020. How we pay attention. *Front. Young Minds* 8:29. doi: 10.3389/frym.2020.00029
2. Atlan, G., Terem, A., Peretz-Rivlin, N., Groysman, M., and Citri, A. 2017. Mapping synaptic cortico-claustral connectivity in the mouse. *J. Comp. Neurol.* 525:1381–402. doi: 10.1002/cne.23997
3. Goll, Y., Atlan, G., and Citri, A. 2015. Attention: the claustrum. *Trends Neurosci.* 38:486–95. doi: 10.1016/j.tins.2015.05.006
4. Torgerson, C. M., Irimia, A., Goh, S. M., and Van Horn, J. D. 2015. The DTI connectivity of the human claustrum. *Hum. Brain Mapp.* 36:827–38. doi: 10.1002/hbm.22667
5. Atlan, G., Terem, A., Peretz-Rivlin, N., Sehrawat, K., Gonzales, B. J., Pozner, G., et al. 2018. The claustrum supports resilience to distraction. *Curr. Biol.* 28:2752–62. doi: 10.1016/j.cub.2018.06.068

פורסם אונליין: 09 בנובמבר 2021

נערך על ידי: Idan Segev, Hebrew University of Jerusalem, Israel

**ציטוט:** Fatal Y and Citri A (2021) לא מרוכזים? ייתכן שהקלאוסטרום שלכם אשם. *Front. Young Minds*. doi: 10.3389/frym.2021.706131

**תורגם והותאם:** Fatal Y and Citri A (2021) Distracted? Blame Your Claustrum! *Front. Young Minds* 9:706131. doi: 10.3389/frym.2021.706131

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

**COPYRIGHT** © 2021 © Fatal and Citri 2021. 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

### NOAR SHOHER MADA TAU (SCIENCE-ORIENTED-YOUTH), גיל: 12-16

אנו חמישה ילדים בגילי 12-16, כולנו בעלי זיקה לנושאים מדעיים ואוהבים את התחום. אנו לומדים בחטיבת ביניים, וחולמים לעסוק בתחום המדעים בעתיד. אנו משתתפים בנוער שוחר מדע באוניברסיטת תל אביב לנוער. בתקופת מגפת הקורונה סקרנו את המאמר יחד, בזום, כל אחד תרם מניסיונו, ותוך כדי כך למדנו והרחבנו אופקים. אנו מודים לליאור אברמסון שהנחתה אותנו בתהליך סקירת המאמר.



## הכותבים

### YONATAN FATAL

אני נער בן 18 מירושלים. מאז ומתמיד אהבתי לשאול שאלות ולמצוא להן תשובה. מה המרחק לירח? כמה תאים יש לנו בגוף? איך המוח שלנו מסוגל לבצע כל כך הרבה פעולות במקביל? בשנים האחרונות הייתה לי זכות ללמוד ביולוגיה לתואר ראשון באוניברסיטה הפתוחה, ואפילו לעבוד במעבדת המחקר של פרופסור ציתרי. מלהיב אותי לחשוב שהעבודה שלי היא בדיוק מה שאני אוהב לעשות – לשאול שאלות ולבצע ניסויים ממוקדים כדי למצוא להן תשובה. מדהים אותי להבין איך תאים בודדים מצליחים להשפיע על אזורי מוח שלמים, ואיך הם מכוונים את ההתנהגות של בעלי חיים ושל בני אדם.

### AMI CITRI

אני פרופסור למדעי המוח באוניברסיטה העברית בירושלים. מרגש אותי להפליג בדמיוני במחשבות על איך המוח שלי פועל בזמן שאני מבצע פעולות שונות בעולם – כמו לכתוב את המשפט הזה. איך המוח מצליח לארגן את מחשבותי ולבטא אותן באמצעות האצבעות שמקישות על המקלדת? מדעי המוח מציעים לנו אפשרות יוצאת דופן להתבונן על עצמנו, תוך כדי שאנו מפתחים תובנות בנוגע למנגנונים המוחיים הבסיסיים שמגדירים מי אנחנו, והנסיבות המכתיבות את התנהגותנו בעולם. \*ami.citri@mail.huji.ac.il



Hebrew version  
provided by

מזיאון המדע ע"ש בלומפילד ירושלים (ע.ר.)  
متحف العلوم على اسم بلومفيلد القدس  
Bloomfield Science Museum Jerusalem

