

כיצד תאי המוח שלכם מדברים זה עם זה – לחישת סודות והודעות פומביות

Mike Ludwig*

המרכז לפיזיולוגיה אינטגרטיבית, אוניברסיטת אדינבורו, אדינבורו, הממלכה המאוחדת

תארו לעצמכם שאתם רוצים לספר לחבריכם משהו חדש; אתם יכולים ללחוץ זאת לאוזניהם או לצעוק בקול רם. זה די דומה לשתי צורות התקשורת שמתקיימות במוחכם. המוח שלכם מכיל מיליארדי תאי עצב הנקראים נוירונים, אשר יוצרים מספר גדול מאוד של קשרים עם אזורים מיוחדים של נוירונים אחרים, הנקראים דנדריטים, ליצירת רשתות. בעבר סברו כי נוירונים מתקשרים זה עם זה באמצעות העברה ("לחישה") של אותות כימיים ישירות דרך הקשרים האלה, אבל כיום אנו יודעים כי הם גם מפצים הודעות בצורה נרחבת יותר ("הודעות פומביות"), על-ידי שחרור אותות כימיים מאזורים אחרים של הנוירונים, כולל הדנדריטים עצמם. אם נבין כיצד הנוירונים מתקשרים זה עם זה ומה הם מתקשרים, נוכל אולי לתקן הפרעות בתקשורת, שעלולות לגרום לשינויי התנהגות וליקויים במוח.

אנו יודעים כי המוח האנושי הוא המבנה המורכב ביותר. יש בו כ-80 מיליארד תאי עצב הנקראים **נוירונים**. שמונים מיליארד (80,000,000,000)! זהו מספר נוירונים הגדול יותר מפי 10 ממספר בני האדם החיים על פני כדור הארץ. נוירונים מתקשרים זה עם זה בעזרת חומרים כימיים מיוחדים הנקראים **מוליכים עצביים**. מוליכים עצביים הם כמו מילים כימיות – הם שולחים "הודעות" מנירון אחד לאחר. יש סוגים רבים ושונים של מוליכים עצביים: חלק מהם מעוררים את הנוירונים וגורמים להם להיות פעילים יותר; אחרים מעכבים אותם

סוקרת צעירה

SARIT

גיל: 14



נוירונים

(Neurons)

תאים של מערכת העצבים הנקראים תאים עצביים או נוירונים, אשר מתמחים בהעברת "הודעות".

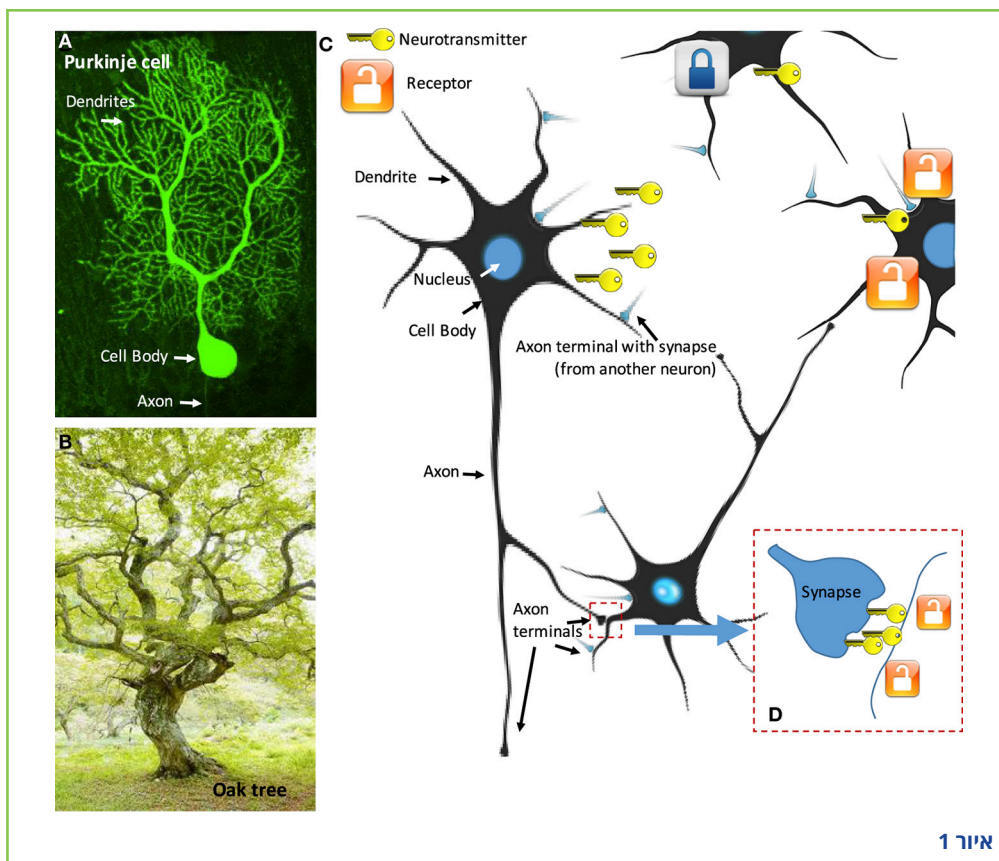
מוליכים עצביים

(Neurotransmitters)

חומרים כימיים שבהם משתמשים נוירונים כדי לתקשר זה עם זה – אפשר לחשוב עליהם כעל "מילים כימיות".

איור 1

A. חלק מהניורונים, כמו הניורון המיוחד הזה, הנקרא תא פורקינייה, דומים מאוד לעצים **B.C.** מוליכים עצביים (מפתח) המשחררים מהכפתורים הטרמינליים צריכים לעבור רווח קטן בלבד (סינפסה), **D.** כדי להגיע לקולטנים שלהם (מנעול). אולם כאשר הם משוחררים מהדנדריטים ייתכן כי הקולטנים שלהם רחוקים מאוד, ויש צורך להגיע אליהם בדיפוזיה. התמונה של תא פורקינייה התקבלה באדיבותה של Marta Jelitai, הונגריה. תא Purkinje cell = תא פורקינייה
 Dendrites = דנדריטים
 Cell body = גוף תא
 Axon = אקסון
 Oak tree = עץ אלון
 Neurotransmitter = מוליך עצבי
 Receptor = קולטן
 Nucleus = גרעין
 Axon terminal with synapse (from another neuron) = כפתור טרמינלי עם סינפסה (מניורון אחר)
 Axon terminals = כפתורים טרמינליים
 Synapse = סינפסה.



איור 1

וגורמים להם להיות פחות פעילים. פשוטו כמשמעו, הניורונים שולטים בכל מה שאתם עושים.

הניורונים הם אבני הבניין של המוח שלכם

ניורונים קיימים בדפוסים, בצורות ובגדלים רבים, אבל כדאי לחשוב על ניורון כעל עץ. לניורון יש שלושה חלקים עיקריים: גוף התא, אקסון ודנדריטים (איור 1). גזע העץ (גוף התא) מאחסן מידע גנטי (דנ"א) באברון הנקרא גרעין. גוף התא מכיל גם את המנגנון הכימי לייצור מוליכים עצביים, שבהם משתמש הניורון כדי לתקשר עם ניורונים אחרים.

ענפי העץ (דנדריט - משמעות המילה היוונית דֶנְדְרוֹן, dendron, היא עץ) הם החלקים בניורון המקבלים אותות. פעם חשבו שהדנדריטים הם כמו אנטנה - רק מקבלים אותות מניורונים אחרים, אבל כיום ידוע שהם יכולים לעשות יותר, כפי שאסביר.

שורש העץ (אקסון) הוא המבנה שבו הניורון משתמש כדי להיקשר לניורון אחר ולתקשר עימו. אקסון מוביל מידע בדומה לכבל חשמלי. כאשר ניורון אחד רוצה לשתף הודעה עם אחר, הוא שולח לאורך האקסון שלו דֶחֶף חשמלי, הנקרא פוטנציאל פעולה, עד שהוא מגיע לכפתור טרמינלי שבקצה האקסון. חשבו על הכפתור הטרמינלי כעל טרמינל בשדה התעופה. טרמינל בשדה התעופה עמוס בנוסעים המחכים להמראה, בעוד שכפתור טרמינלי עמוס במוליכים עצביים המחכים להגיע לניורון הבא.

מהם ההבדלים בין שידור מְחֻטָּ לבלתי מְחֻטָּ?

כאשר פוטנציאל הפעולה מגיע לכפתור טרמינלי, חלק מהמוליכים העצביים שבטרמינל מושלכים לרווח זעיר הנמצא בין הטרמינל לדנדריט של נירון אחר. רווח זה נקרא סינַפְסָה, והוא זעיר כל כך שהוא נמדד בננומטרים – מיליארדית המטר. המוליך העצבי חוצה את הסינפסה ונקשר לאתר מיוחד הנקרא קולטן, בצד השני של הרווח. כל מוליך עצבי נקשר רק לקולטן המיוחד שלו, בדיוק כפי שמפתח מתאים רק למנעול מסוים. כתלות בסוג המוליך העצבי הוא יכול לעורר את הנירון האחר או לעכב אותו, ובזאת לגרום לכך שיהיה סביר יותר או סביר פחות שהנירון האחר ישלח פוטנציאל פעולה משלו. כל זה קורה בדיוק רב, וחוזר על עצמו שוב ושוב. היות שהאות מנירון אחד לאחר מועבר במהירות גבוהה מאוד (עד 100 מטר לשנייה, מהר יותר ממהירות יונק היבשה המהיר ביותר, הצ'טה, שיכולה להאיץ עד למהירות של 29 מטר לשנייה), סוג זה של תקשורת בין נירונים נקרא לפעמים "שידור מְחֻטָּ". המוליכים העצביים מעבירים "סודות נלחשים" ישירות מנירון אחד לאחר; הם נושאים הודעה שיש לה חשיבות רק בזמן ובמקום מסוימים. דרך אחת לחשוב על "שידור מְחֻטָּ" היא לחשוב על מְתַג של אור, שמפעיל נורת חשמל ומכבה אותה.

כמה מוליכים עצביים, במיוחד סוג אחד הנקרא **ניורופפטיד**, מתנהגים שונה. הניורופפטידים משוחררים מְחֻלְקִים רבים של הנירון, כולל מהדנדריטים. במקום להיות משוחררים לסינפסה הזעירה שבין הכפתור הטרמינלי לנירון אחר, הם משוחררים לנוזל הממלא את החללים שבין הנירונים, ועוברים בדיפוזיה ברחבי המוח כדי להגיע לקולטנים הנמצאים ביעדים רחוקים. דרך אחת לחשוב על דיפוזיה היא לחשוב על הליכה ביער (איור 2). תנועה מנקודה אחת לאחרת במקום שאין בו עצים היא פשוטה ומהירה. ברגע שיש הרבה עצים, ייקח הרבה יותר זמן להגיע מנקודה אחת לאחרת, כי צריך לעקוף את העצים. כלומר, צורת איתות זו איטית הרבה יותר מאיתות בסינפסות, אבל לבסוף יגיעו הניורופפטידים לרוב חֻלְקֵי המוח. אולם רק אזורי מוח שנמצאים בהם הקולטנים המתאימים יכולים להגיב לניורופפטידים. כך, שחרור ניורופפטידים על-ידי הדנדריטים, כמו Wi-Fi הוא איתות "בלתי מְחֻטָּ" – הודעות אלה הן "הודעות פומביות" שאינן נשלחות מתא אחד לאחר, אלא מקבוצה אחת של נירונים לקבוצת נירונים אחרת [1].

ואזופרסין ואוקסיטוצין יכולים להשפיע על ההתנהגות של איתות "בלתי מְחֻטָּ"

הרשו לי להשתמש בדוגמה אחרת. הניורופפטידים ואזופרסין ואוקסיטוצין מיוצרים על-ידי נירונים גדולים ב**היפּוֹתְלָמוֹס** – חֻלְקֵי במוח שיש לו תפקיד חשוב בוויסות תהליכים פיזיולוגיים רבים בגוף. לנירונים גדולים אלה יש אקסון אחד שנמתח עד לבלוטה מיוחדת, **בלוּטֵת יוֹתְרָת המוח**, המחוברת לתחתית המוח. משם, הניורופפטידים משוחררים מהכפתורים הטרמינליים הַיֵּשֶׁר אל הדם. אוקסיטוצין נע ברחבי הגוף, ויש לו תפקיד בלידה ובהנקה. ואזופרסין משפיע על לחץ הדם ומוֹסֵת את מַאָזְן המים באמצעות הפלויות. שני הניורופפטידים האלה משוחררים גם אל המוח, שֶׁם הם אחראים לסוגים שונים של התנהגויות. למשל, אוקסיטוצין מסייע לאימא להיקשר אל התינוק שלה; ואזופרסין משפיע על זיכרון ועל תוקפנות. אולם אזורי המוח האחראים להתנהגויות האלה רחוקים לפעמים מֵהֶתְאָיִם המייצרים את הניורופפטידים. בחלק מהאזורים האלה יש את הקולטנים הנכונים, אבל אין בקרבם אקסונים וטרמינלים, ולכן לא יכול להתקיים איתות "מְחֻטָּ" על-ידי ואזופרסין ואוקסיטוצין.

ניורופפטידים

(Neuropeptides)

סוג מיוחד של מוליכים עצביים. הם משפיעים על פעולות במוח ובגוף, למשל ויסות רמת האנרגיה באדם.

היפּוֹתְלָמוֹס

(Hypothalamus)

ההיפּוֹתְלָמוֹס הוא אזור במוח אשר מוֹסֵת תפקודים כגון צמא, תיאבון ושינה.

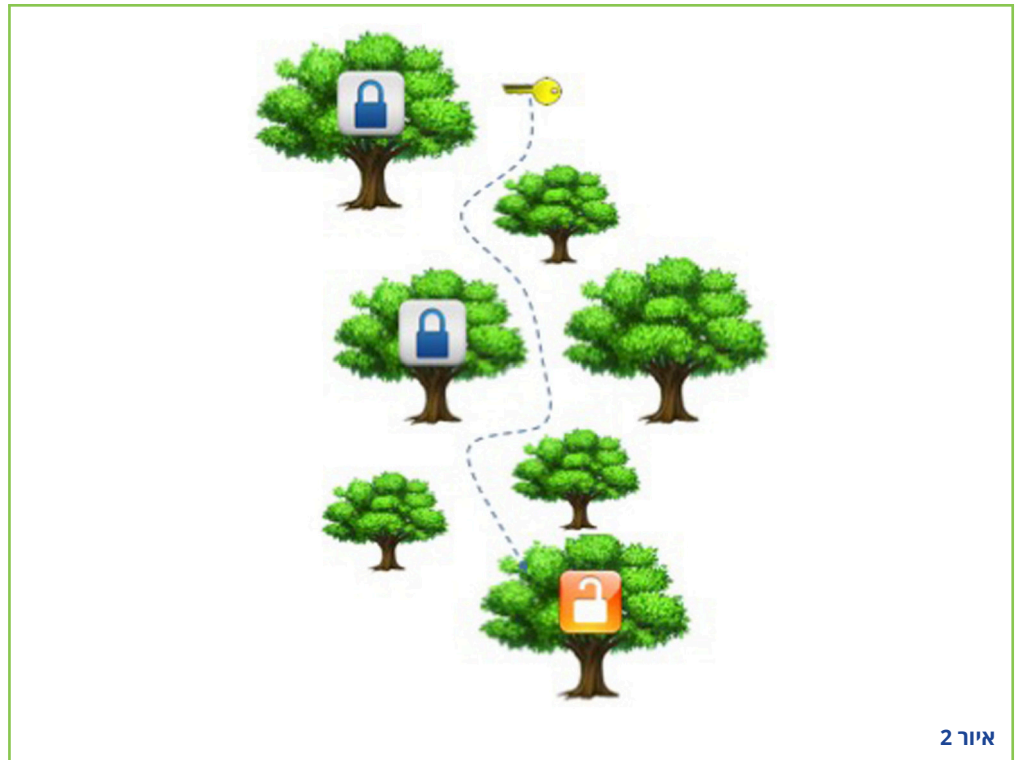
בלוּטֵת יוֹתְרָת המוח

(Pituitary gland)

בלוּטֵת יוֹתְרָת המוח ממוקמת בחלל גֵרְמֵי קֶטֶן שנמצא בבסיס המוח. היא מחוברת להיפּוֹתְלָמוֹס ומפרישה הורמונים המוֹסֵתים פעולות גוף שונות ורבות.

איור 2

ניורופפטידים (מפתח) משחררים לחלל שבין הניורונים (עצבים) ועוברים בדיפוזיה ברחבי המוח כדי להגיע לקולטנים (מנעולים) היכולים להיות ביעדים מרוחקים. התייחסו לדיפוזיה כאל הליכה ביער. הזמן שייקח להגיע למנעול שלכם (קולטן) תלוי בעצים הרבים (ניורונים) או תאים אחרים שאותם עליכם לעקוף.



ואזופרסין ואוקסיטוצין המשחררים מהכפתורים הטרמינליים אל הדם אינם יכולים להיכנס מחדש למוח, בגלל מבנה מוזר הנקרא מחסום הדם-מוח. חשבו על כך – כאשר תִּתְחַלוּ, לא תרצו שהחידקים או הנגיפים יחדרו למוח שלכם! מחסום הדם-מוח הוא שכבת תאים השומרים על המוח מגורמי מחלה, מרעלים וממולקולות אחרות הנעות בזרם הדם. הוא מונע מפולשים להיכנס למוח. אולם ואזופרסין ואוקסיטוצין משחררים גם מהדנדריטים של הניורונים הַיֵּשֶׁר אל תוך המוח. מדענים גילו כי שחרור הניורופפטידים מהדנדריטים (אל תוך המוח) ומהכפתורים הטרמינליים (אל תוך הדם) יכול להתרחש באופן בלתי תלוי. שחרור ואזופרסין ואוקסיטוצין מהכפתורים הטרמינליים מְּוֹסֵת על-ידי פוטנציאלי פעולה, בדומה לשחרור המוליכים העצביים בכל הניורונים האחרים. אולם כמה אותות כימיים במוח יכולים לעורר שחרור של ניורופפטידים מהדנדריטים ללא הפעלת פוטנציאלי פעולה. שחרור המוליכים העצביים בדרכים שונות אלה מאפשר ויסות של השפעות הניורופפטידים על הגוף בנפרד מוויסות השפעותיהם על המוח. למשל, נוסף על השפעתו של אוקסיטוצין על הגוף בתהליכים כגון לידה והנקה, הוא גם יכול לעודד את החיבור של הָאֵם לתינוק שלה – פעולות של המוח. כך מובטח שהרך הנולד יקבל את כל מה שנחוץ לו בדחיפות: מזון ואהבה (איור 3) [2].

הורמונים

(Hormones)

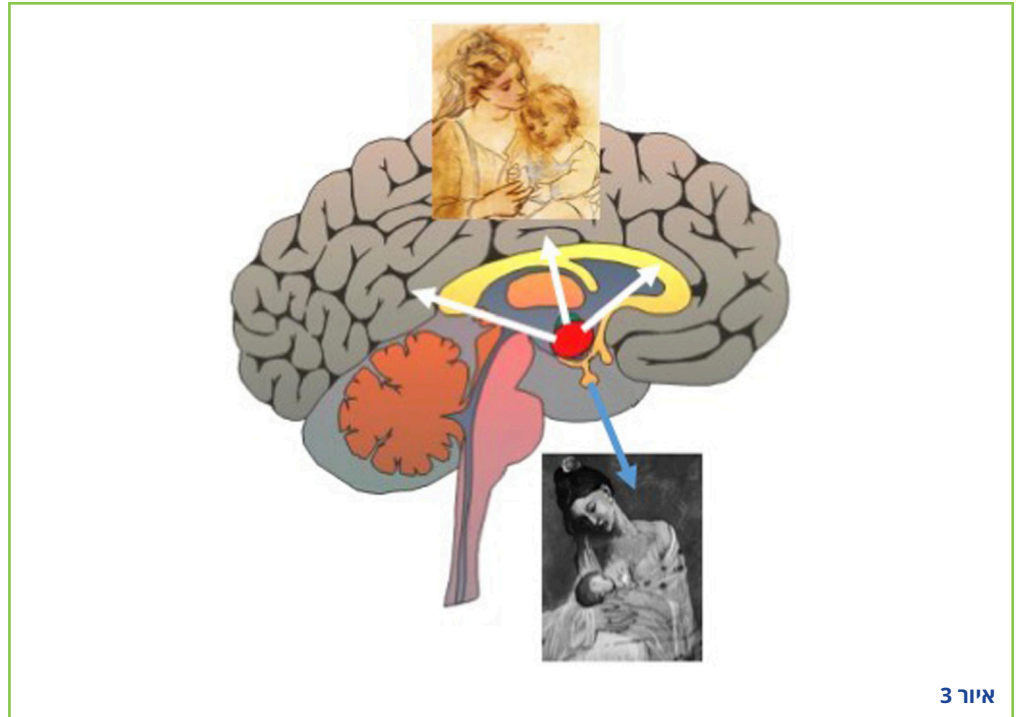
הורמונים הם חומרים כימיים מיוחדים שהגוף מייצר כדי לסייע לו לבצע דברים מסוימים כגון גדילה והתבגרות מינית – כאשר מתחילים להתפתח למבוגרים. בזמן זה, הגוף שלכם עמוס בהורמונים אשר מורים לו שהגיע הזמן להתחיל להשתנות.

האם ניורופפטידים זהים להורמונים?

שחרור של ניורופפטידים על-ידי הדנדריטים של הניורונים דומה מאוד לשחרור של הורמונים באזורים אחרים בגוף. הורמונים הם השליחים הכימיים המשחררים על-ידי בלוטות ומְּסַעֵים בזרם הדם לתאים ביעדים מרוחקים. כך, הורמונים יכולים להשפיע על תאים שממוקמים רחוק מאוד מהבלוטות שבהן הם נוצרו. ישנם הורמונים רבים ושונים, ולהם תפקידים רבים ושונים בגוף. למשל, פרולקטין, הורמון נוסף המשחרר מבלוטת יותרת המוח, נע לחזה

איור 3

אוקסיטוצין משוחרר לדם מאקסונים הנמצאים בבלוטת יותרת המוח (חץ כחול) ואל תוך המוח (חיצים לבנים) מהדנדריטים של ניוירונים הנמצאים בהיפוטלמוס (אזור אדום). אוקסיטוצין פועל גם בגוף וגם במוח כדי לוודא שהתינוק מקבל מזון (פעולת האוקסיטוצין על הגוף) ואהבה (פעולת האוקסיטוצין על המוח).



איור 3

של הָאֵם וְשֶׁם מעורר את ייצור החלב להנקה. תהליך זה של איתות "בלתי מְחֻסָּט" על-ידי הורמונים דומה לאיתות על-ידי הניורופפטידים במוח – אפשר לקרוא לניורופפטידים "הורמוני המוח".

מדוע חשוב להבין את האיתות של המוליך העצבי?

כמה מהפרעות ההתנהגות שבהן קשה מאוד לטפל, ושעבורן נחוצים בדחיפות טיפולים, משפיעות על התנהגויות שבהן מעורבים ואזופרסין ואוקסיטוצין [3]. כפי שצוין למעלה, אוקסיטוצין מעורב בלידה, בהנקה ובהתנהגות הָאֵם בקשר לטיפול בילדים. אבל, אוקסיטוצין חשוב גם להתפתחות התינוק וליכולתו לָקִים קשרים מורכבים עם אחרים. לעיתים קרובות, ילדים מסוימים הסובלים מאוטיזם מתקשים להבין קשרים אלה ולהגיב אליהם, ומדענים מנסים להשתמש באוקסיטוצין כטיפול פוטנציאלי (אם אתם רוצים ללמוד על כך יותר, קראו את המאמר שכתבו Daniel Quintana ו-Gail Alvares, ומופיע באתר של "פרונטייר" – מדע לצעירים) [4].

דוגמה נוספת כוללת הפרעות הקשורות ללחץ ולחרדה, הפרעות אכילה, הפרעות התמכרות לחומרים (כולל התמכרות לאלכוהול) והפרעות בהתנהגות המינית. אלה בעיות בריאות חמורות, שהשפעתן על בני האדם ניכרת. על-ידי הבנה טובה יותר של האינטראקציה בין תאי המוח ובין הניורופפטידים, ייתכן כי נמצא דרכים לטפל בכמה מההפרעות האלה ולשפר את איכות חיינו.

אוטיזם (Autism)

ילדים רבים הסובלים מאוטיזם מתקשים להבין מה אנשים אחרים חושבים וכיצד הם מרגישים. ילדים אלה עלולים להתנהג באופן בלתי רגיל, ויכול להיות קשה להבין מדוע הם מתנהגים כך.

תודות

אני רוצה להודות לחברים ולעמיתים שלי בעבודה, שהעירו על כתב היד, במיוחד לחבריי David ו-Gareth, אשר וידאו-ששתמש במילים הנכונות כדי שילדים יוכלו להבינן. הייתי רוצה להודות גם ל-Márta על תמונת תְּאִי ה-Purkinje.

מקורות

1. Ludwig, M., and Stern, J. E. 2015. Multiple signalling modalities mediated by dendritic exocytosis of oxytocin and vasopressin. *Philos. Trans. R. Soc. Lond. B Biol. Sci.* 370(1672):20140182. doi: 10.1098/rstb.2014.0182
2. Ludwig, M., and Leng, G. 2006. Dendritic peptide release and peptide-dependent behaviours. *Nat. Rev. Neurosci.* 7:126–36. doi: 10.1038/nrn1845
3. Neumann, I. D., and Landgraf, R. 2012. Balance of brain oxytocin and vasopressin: implications for anxiety, depression, and social behaviors. *Trends. Neurosci.* 35:649–59. doi: 10.1016/j.tins.2012.08.004
4. Quintana, D. S., and Alvares, G. A. 2016. Oxytocin: how does the neuropeptide change our social behaviours? *Front. Young Minds* 4:7. doi: 10.3389/frym.2016.00007

פורסם אונליין: 08 בפברואר 2019

נערך על ידי: Lesley K. Fellows, McGill University, Canada

ציטוט: Ludwig M (2019) כיצד תאי המוח שלכם מדברים זה עם זה – לחישת סודות והודעות פומביות. *Front. Young Minds.* doi: 10.3389/frym.2017.00039-he

תורגם והותאם:

Ludwig M (2017) How Your Brain Cells Talk to Each Other—Whispered Secrets and Public Announcements. *Front. Young Minds* 5:39. doi: 10.3389/frym.2017.00039

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

COPYRIGHT © Ludwig 2017. 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.

סוקרת צעירה

SARIT, גיל: 14

שלום! שמי שרית, ואני ילדה בת 14 מקנדה. חלק מתחביבי הם לנגן בצ'לו, לקרוא המון ספרים ולכתוב.



בחורף, אני אוהבת להחליק על השלג עם משפחתי ועם חבריי. אני אוהבת ללמוד דברים חדשים, במיוחד אם הם קשורים למתמטיקה ולמדע, המקצועות האהובים עליי בבית הספר.

הכתב

MIKE LUDWIG

נולדתי וחונכתי בגרמניה. כיום אני פרופסור באוניברסיטת אדינבורו, בסקוטלנד, הממלכה המאוחדת. אני מוביל קבוצת מחקר החוקרת את המנגנון הבסיסי של שחרור הניורופפטידים, ואת פעולת הניורופפטידים על רשתות עצביות ועל התנהגויות. נוסף על מחקר אני אוהב לשחק עם הכלב שלי (פעם הייתה לי קבוצת כלבי מזחלות של שישה כלבים מסוג האסקי) או לטייל בספארי צילומים. *mike.ludwig@ed.ac.uk



Hebrew version
provided by

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

