

הפתרון החדש לתעלומת חוש הניווט המגנטי של בעלי חיים: חיידקים

כשצמד חוקרים ישראלים הציע ב-2017 כי חיידקים עם חישה מגנטית מסייעים לבעלי החיים בניווט, הקהילה המדעית היתה ביקורתית בלשון המעטה. כעת הם מפרסמים מחקר חדש עם ראיות ראשונות שתומכות בהנחה שלהם: "אנחנו נחשבים פחות משוגעים"

16:55 13.08.2020 [אסף רונאל](#)

כשצמד החוקרים הישראלים, ד"ר אביתר נתן וד"ר יוני וורטמן, הציגו לראשונה את הצעתם לפתרון תעלומה המעסיקה מדענים זה זמן רב, הם נדחו בזלזול ואף בזעם. השנה היתה 2017 ועד לאותה העת, איש עדיין לא הצליח להבין כיצד פועל החוש המגנטי המסייע לבעלי חיים לנווט במרחב - חרף עשרות שנות מחקר. אולם, טענת החוקרים שלפיה חיידקים עם חישה מגנטית (שנקראים חיידקים מגנטוטקטיים) מסייעים לבעלי החיים להתמצא במרחב, הותרה רבים בקהילה המדעית ספקנים. השבוע הגיע תורם של חלק מהספקנים לפקפק בעצמם, לאחר שהשניים פרסמו מאמר בכתב העת המדעי Philosophical Transactions of the Royal Society B, המציג עדויות ראשונות התומכות בהיפותזה שלהם. "עד כה, הורדנו מעלינו חלק מהביקורות ואנחנו נחשבים פחות משוגעים", אומר וורטמן בראיון ל"הארץ", "אני מקווה לפחות".

במאמר החדש מציגים ד"ר נתן מאוניברסיטת אוקספורד וד"ר וורטמן ממכללת תל חי, יחד עם עמיתיהם, ראיות גנטיות לנוכחות חיידקים מגנטוטקטיים באלפי דגימות שנאספו ממגוון רב של מיני בעלי חיים. הגילוי מציב את הרעיון החדש בשורה אחת עם ההיפותזות המוכרות שמנסות להסביר את היכולת המופלאה, שעד היום לא הצליחו להציג עדויות משכנעות יותר לנכונותן.

חוש הניווט המגנטי הודגם לראשונה בניסוי בבעל חיים, שתועד במאמר פורץ דרך מ-1972. הניסוי, שנערך על ידי מדענים גרמנים, בהובלת וולפגנג וילצ'קו, הראה לראשונה כי ציפור השיר הקטנה אדום החזה מסוגלת לכוון את עצמה בהתאם לשדה המגנטי שסביבה. מאז, מחקרים שונים מצאו שהיכולת הזו קיימת במגוון רב של בעלי חיים: מחיידקים, דרך תולעים ועד צבי ים, מספר רב של ציפורים ואף יונקים כמו עטלפים וחולדים.

ישנם שני סוגי ניווט מגנטי. בראשון, החיה משתמשת בחוש המגנטי כמצפן, ומסוגלת לזהות היכן נמצא הצפון. בסוג השני, החיה משתמשת במפת השדה המגנטי של כדור הארץ, ויכולה לנווט מנקודה א' לנקודה ב' בעזרתה. היכולת הראשונה משמשת מינים שונים של בעלי חיים למטרות שונות. למשל, תולעים נעזרות בחוש הזה כדי לחזור על עקבותיהן למחילה שלהן. מיני חד-תאים ימיים נעזרים בחוש דווקא כדי להבחין בין מעלה ומטה בעמודת המים שבה הם נעים.

ד"ר אהוד ויינפיסקי מבית הספר הבין-פקולטי למדעי המוח באוניברסיטת בן גוריון, שמתמחה בניווט של בעלי חיים ולא היה מעורב במחקר הנוכחי, מסביר כי ליכולת השנייה – להגיע מנקודה א' לנקודה ב' בעזרת החוש המגנטי – ישנן מגבלות של דיוק (בטווח של כעשרה עד 30 ק"מ לפחות). הסיבה: השדה המגנטי אינו אחיד וקבוע, ותהליכים טבעיים אקראיים גורמים לתנודות קטנות בו בכיוונים

אקראיים. בנוסף, ידוע כי בעלי חיים, בין אם ציפורים או עטלפים, משתמשים גם בחושים אחרים כדי לנווט. למשל, יונים יעדיפו לנווט בעזרת חוש הריח והראייה כשהדבר אפשרי. אך מחקרים הראו כי הן מסוגלות למצוא את דרכה גם בעזרת השדה המגנטי.

50 שנות מחקר ותעלומה

עד כה, יכולת הניווט המגנטי מנקודה אחת לנקודה שנייה הוצגה במספר מצומצם יחסית של מינים - בעיקר ציפורים נודדות - מכמה סיבות, הבולטת שבהן נעוצה בקושי לערוך מחקרים מבוקרים בקנה מידה גדול. אולם, מלבד שאלת היקף השימוש בחישה המגנטית בבעלי חיים, גם אחרי 50 שנות מחקר ויותר, שאלה בסיסית עוד יותר נותרה פתוחה לחלוטין: מה הוא החיפושן, או הקולטן, שמשמש את בעלי החיים כדי לקלוט ולתרגם את המידע המגנטי?

לחמשת החושים המוכרים יש קולטנים שמתרגמים את האות החיצוני למידע עצבי. בעיניים אלה קולטנים שמגיבים לאור, באף למולקולות של ריח, וכן הלאה. אך הקולטן שמגיב לשדה המגנטי בבעלי חיים לא נמצא עד היום.

ההיפותזה הבולטת הראשונה שהוצעה כקולטן היא נוכחות של מינרלים מגנטיים קטנים (שנקראים מגנטיטים) בגופם של בעלי חיים. ואכן, מחקרים רבים ושונים מצאו מגנטיטים במגוון בעלי חיים - כולל בבני אדם. אולם, עד היום, מסביר ויינפיסקי, לא נמצא שום קשר בין המקום שבו נמצאו המגנטיטים בגוף לבין מערכת העצבים. לכן, המנגנון שבעזרתו השדה המגנטי מתורגם למידע עצבי נותר עלום.

ב-25 השנים האחרונות, היפותזת המגנטיטים נזנחה ברובה, לטובת מנגנון אחר, שבו החישה נעשית בעזרת מולקולות המגיבות לשדה המגנטי בשל אפקט קוונטי מסוים. היתרון בהיפותזה זו היא שמולקולות כאלה נמצאו ברשתית של ציפורים נודדות, למשל. כשהאור מתאים, ייתכן שהציפור קולטת את השינוי בהן בעזרת מערכת העצבים שקשורה לראייה.

עדות נוספת לנכונות אפשרות זו מצוייה במחקרים שהראו כי החוש המגנטי פועל רק כשהציפור נחשפת לאור באורכי גל קצרים - שלכאורה יכולים לאפשר לה לראות את המולקולות. אולם, ויינפיסקי מוסיף כי הבעיה היא שהאפקט הקוונטי חלש מאוד, ועד היום לא הצליחו להראות שהעוצמה שלו יכולה להספיק כדי להותיר רושם חושי. כפי שמנסח זאת וורטמן, "פיזיקלית ההסבר בעייתי, וכבר 25 שנה שלא מצליחים למצוא לו ראיות".

הרעיון להפנות את המבט לחיידקים המגנטוטקטיים החל די במקרה, מספר נתן, שמתמחה בביופיזיקה ואינטראקציות בין חלבונים. "כדוקטורנט קיבלתי המלצה מקולגה לעבור על כל הכתבות של כל העיתונים המובילים", הוא משחזר. באחת הפעמים, הוא קרא בתוכן העניינים כי המנגנון מאחורי נדידת הציפורים שהוצע לאחרונה התברר כטעות - פעם נוספת. כמה מאמרים מתחת היה מחקר שהציג ממצא על החיידקים המגנטוטקטים. "לא ממש הייתי מודע לקיומם עד לאותו רגע", הוא נזכר, "כל מה שעשיתי היה לחשוב: ירגע, אולי מדובר בסימביוזה והם פשוט מדברים ביניהם. בגלל שאני לא מומחה לציפורים הייתי מוכרח שותף. דיברתי עם כמה אנשים אבל לא הייתה לי תחושה טובה לגבי אף אחד מהם, ואז חבר משותף שידך אותי ליוני".

השניים החלו לדבר על הרעיון הראשוני ולחשוב על דרכים לבסס אותו. הם פרסמו את ההיפותזה ב-2017 במאמר שהתפרסם בכתב העת המדעי Movement and Ecology. כשנה לאחר מכן,

המאסטרנט שלהם, יובל וורבר, שחתום גם הוא על המאמר החדש, הציג בכנס בבריטניה מחקר ראשון שאותו החלו לערוך על ציפורים נודדות שקיבלו אנטיביוטיקה, כדי לראות אם הפגיעה בהרכב החיידקים בבטן ישפיע על יכולתן להשתמש במצפן הפנימי שלהן.

"נראה היה שכל הקהל קרא את המאמר והתכוון למצגת", מספר וורטמן, "זה לא קורה אף פעם. והם באו כדי להחטיף". לדבריו, הוא ועמיתיו הופתעו מהחשיפה המהירה שקיבל הרעיון שלהם בין העוסקים בתחום – ומההתנגדות שהוא עורר. הטענה העיקרית שהועלתה נגדם היתה שאם הרעיון נכון, מדוע לא נמצאו חיידקים כאלה בבעלי חיים עד היום?

"ואז נעמד החוקר רוברט פיטאק, אמר שהוא דווקא מצא – מחיפוש שהוא עשה בינתיים במאגרים פומביים ברשת", נזכר וורטמן. המפגש, מספר וורטמן, הוביל למחקר הנוכחי. במסגרתו פיטאק חבר אליהם והארבעה סקרו מאגרים מטא-גנומיים פומביים בחיפוש אחר חיידקים מגנטוטקטיים.

במחקרים מטא-גנומיים, מרצפים מדעניות ומדענים את כלל החומר הגנטי שנמצא בדגימות אותם הם אוספים, בין אם מעור או קיבת בעל חיים, או משלולית מים או תלולית אדמה. לאחר מכן, הם מחפשים רצפים גנטיים מוכרים של מיני בעלי חיים המעניינים אותם. אך במקרים רבים, הקובץ שכולל את כלל הדאטה נשלח גם למאגרים מדעיים משותפים, ומאפשר לאחרים לחפש את הדנ"א של בעלי החיים שמעניינים אותם בדגימות.

במחקר הנוכחי, חיפשו וורטמן ועמיתיו אחר החומר הגנטי של 21 מיני חיידקים מגנטיים מוכרים ביותר מ-50 אלף דגימות. בסך הכל, הם מצאו דנ"א של חיידקים אלה בקרוב ל-5,000 דגימות ממינים רבים ושונים של בעלי חיים, בהם צבי ים, פינגווינים, עטלפים, בני אדם ולווייתנים. "בעצם, הראנו שאף אחד לא מצא חיידקים מגנטוטקטיים בבעלי חיים, כי אף אחד לא חיפש", מסביר וורטמן.

מלבד ההצלחה בעמידה ב"קריטריון הסף", עליו הצביעו החוקרים השונים בכנס בבריטניה, הניתוח העלה גילוי מסקרן נוסף, שגם פותח פתח למחקר עתידי: בדגימות נמצאו שיעורים משתנים של מיני החיידקים השונים. אולם, אם בדגימה אחת של מין מסוים של לווייתן נמצא מין דומיננטי של חיידק, הוא בלט גם בדגימות אחרות שנלקחו מאותו מין של בעל חיים – גם אם אלה שני לווייתנים שחיים באזורים וזמנים אחרים.

יתרה מזאת, הם גילו כי אותם שלושה מינים דומיננטיים אופייניים שנמצאו בעטלפים, נמצאו גם בלווייתנים. דמיון מעין זה נמצא בהרכב החיידקים של פינגווינים וצבי ים. השוני בין הדגימות של הציפורים והזוחלים הימיים לאלה של היונקים הימיים היה גדול בהרבה מזה שבין החיידקים בדגימות מהלווייתן והעטלף. אם כן, ייתכן ששני היונקים, המעופף והחי בים, ירשו את החיידקים המגנטוטקטיים מהאב הקדמון המשותף שלהם, שחי לפני מיליונים רבים של שנים. אז ניתן יהיה לצייר עצי משפחה של החיידקים במינים השונים של בעלי חיים.

עוד נקודה שמציין וורטמן היא כי המגנטיטים שנמצאו בבעלי חיים שונים זהים למגנטיטים בחיידקים. "אז ייתכן שהחלקיקים שבמשך עשרות שנים ניסו להסביר בעזרתם את החוש הם רק סימן לנוכחות של החיידקים". בזמן שהם עבדו על המחקר שלהם, חוקר צרפתי פרסם מחקר שהציע תמיכה להיפותזה החדשנית. הוא הראה כיצד פרוטיסטים, שהם יצורים חד תאיים מגודלים במיוחד, שחיים בסמוך לקרקעית האוקיינוס, זוכים בחישה מגנטית בזכות זה שהם מכוסים בשכבה עבה של חיידקים מגנטוטקטיים, שמאפשרים להם להתכווץ בהתאם לשדה המגנטי שסביבם.

"המחקר הזה היה הראשון שהראה קשר ישיר בין חישה מגנטית לחיידקים", אומר וורטמן. המחקר הצרפתי גם מצביע על אפשרות אחת מבין כמה שהחוקרים מציעים למנגנון שמאפשר את העברת המידע המגנטי שקולטים החיידקים אל בעל החיים בסימביוזה עמו הם חיים.

מעבר לכך, הם מזכירים כי במערכת העצבים יש קולטנים דמויי שיערות, שאינם גדולים מהפרוטיסטים ולכן מתאימים לסימביוזה אפקטיבית עם מיקרואורגניזמים. כמו כן, הם מראים שהחיידקים המגנטוטקטיים מפיקים מספר רב של חלבונים שמשמשים בתקשורת בין חיידק אחד לשני – ובין חיידק לתאים אחרים. חלבונים אלה, מסביר נתן, יכולים לשמש להעברת המידע המגנטי אל מערכת העצבים.

לבסוף, הם גם מעלים את האפשרות שהחיידקים נמצאים בבלוטת הדמע, וכי הם נפלטים לעין ומכסים את הרשתית. אז, כשהאור מתאים, ייתכן שהם נקלטים בידי העצבים של מערכת הראייה – כמו ההסבר שהוצע לאופן הפעולה של המולקולות עם האפקט המגנטי הקוונטי שחוקרים אחרים מחפשים.

"אולם כל אלו הן השערות על גבי השערות", מדגיש וורטמן. עתה, הוא ועמיתיו מתקדמים על בדיקת השפעת האנטיביוטיקה על יכולת הניווט המגנטי של ציפורים. הם גם מתכננים להתחיל לחפש את החיידקים בעזרת דגימות מאברים שונים בגופם של בעלי חיים.