

תהליך ההפיכה ל"ספיידרמן"

Felix Simon Christian Quade^{1*}, Natascha Turetzek^{2*}

¹ביולוגיה התפתחותית מולקולרית, זואולוגיה כללית וביולוגיה התפתחותית, אוניברסיטת יוסטוס-ליביג גייסן, גייסן, גרמניה
²אוניברסיטת לודוויג-מקסימיליאנס במינכן, מינכן, גרמניה

סוקר צעיר

JAMES

גיל: 11



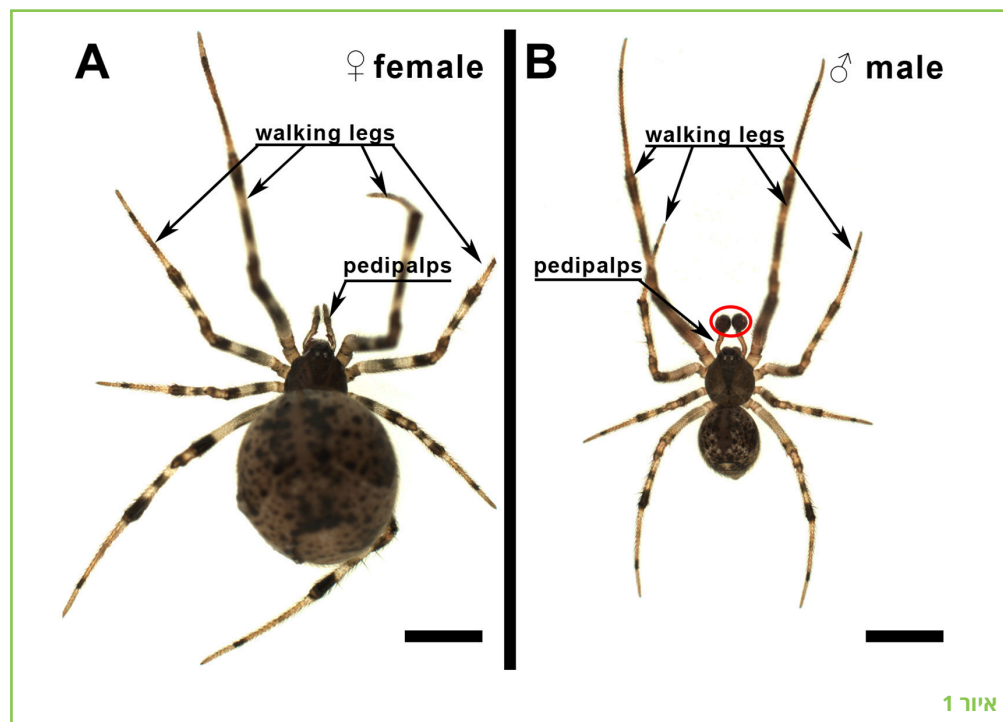
ספיידרמן מקבל את כוחות-העל שלו מנשיכת עכביש. לזכרי עכביש אמיתיים אין כוחות מיוחדים, אולם יש להם איבר מיוחד שאין לנקבות העכביש. הוא נקרא איבר בולבוס (bulbus), והוא נדרש להזדווגות ולכן הוא חשוב מאוד. מרתק שאיבר הבולבוס חסר אצל עכבישים צעירים וצריך להתפתח בתוך אזורים זעירים בחלק הקדמי של העכביש, שנקראים רגלי בחנין (pedipalps). האופן שבו איברים מתפתחים בתוך איברי גוף שכבר מתפקדים בלבד חוקרים במשך שנים. לאחרונה, מדענים מצאו שאיבר הבולבוס מתפתח מקבוצה קטנה של תאים, שנוכחים בשלב מוקדם בהתפתחותו של העכביש. באופן מעניין, במהלך ההתפתחות של איבר הבולבוס, מבנים אחרים ברגלי הבחנין נבנים לגמרי מחדש מחומר מסתורי. תהליך כזה בדרך כלל מתרחש רק במהלך מטמורפוזה של חרקים. זו הדוגמה הראשונה לתהליך דמוי מטמורפוזה המתרחש במינים שלא מבצעים מטמורפוזה. אם כן, אולי לעכבישים יש כוחות-על אחרי הכול!

האם אתם יודעים להבחין בין איש עכביש לאשת עכביש?

הרבה אנשים כל כך פוחדים מעכבישים שהם מעולם לא התבוננו מקרוב על היצורים המרתקים האלה. עכבישים הם חשובים מאוד! אלפי סוגי עכבישים שונים קיימים, וממלאים

איור 1

השוואה בין נקבה (A) וזכר (B) של עכביש. נקבות בדרך כלל גדולות יותר בגודל, ועשויות להיות בצבע שונה מזכרים. גם לנקבות וגם לזכרים עכבישים יש גפיים קטנות בחלק הקדמי של גופם שנקראות רגלי בחנין. לזכרים יש איבר מיוחד שנקרא איבר בולבוס על רגלי הבחנין שלהם. איברי הבולבוס נראים כמו כפפות אגרוף והם מודגשים באיור על ידי העיגול האדום שעל גבי רגלי הבחנין של הזכר (מימין).



איור 1

הרבה תפקידים שונים. לדוגמה, טריפת חרקים מסוימים או עכבישים אחרים מסייעת לשמור על מערכת אקולוגית מאוזנת. עכבישים הם גם מרתקים בשל הסממנים המיוחדים שלהם, כמו למשל משי חזק וגמיש שמשמש לבנות רשתות מורכבות ויפות, ייצור של ארס ואסטרטגיות הציד וההזדווגות השונות שלהם. המאפיינים והכישורים האלה משתנים בין עכבישים זכרים ונקבות. אולם אלה מבנים גורמים לשוני שבין עכבישים זכרים ונקבות?

אתם ככל הנראה מכירים הרבה חיות שבהן הזכרים והנקבות נראים שונים מאוד. לאריות זכרים, למשל, יש רעמות יפהפיות, בעוד שללביאות אין. אצל ציפורים, זכרים נוטים להיות צבעוניים, בעוד שנקבות לא – חשבו על ברווזים, תרנגולות וטווסים. אולם האם אתם יודעים להבחין בין איש עכביש לבין אשת עכביש? בדרך כלל, נשות עכביש הן גדולות יותר, אולם רק אם הן מוזנות כראוי. נקבות גם יכולות להיות בצבע שונה מאשר זכרים של אותו המין, אולם זה לא נכון עבור כל המינים. אתם יכולים להשתמש בתכסיס בטוח אחר כדי לזהות עכביש זכר. לפני ארבעת רגליהם המשמשות להליכה, גם לעכבישים וגם לעכבישות יש זוג גפיים נוסף, שנקראות **רגלי בחנין**. רגלי הבחנין משמשות להרבה כישורי עכביש שהוסברו לעיל כמו אכילה, חישה, תפיסת טרף והזדווגות. ממש בסופן של אותן רגלי הבחנין רק לעכבישים זכרים בוגרים יש איבר מיוחד, שנראה כמו כפפות אגרוף. באיור 1 אתם יכולים לראות את האיבר המיוחד הזה, שנקרא **איבר בולבוס**. הזכר הבוגר משתמש באיבר הבולבוס הזה כדי להעביר את הזרע שלו אל הנקבה במהלך ההזדווגות. לכן איבר הבולבוס ממלא תפקיד הכרחי אצל עכבישים, מאחר שהוא מבטיח את ייצור הצאצאים.

כיצד עכבישים גדלים?

אף על פי שנקבות זכרים עכבישים נולדים שניהם עם רגלי בחנין, רק הזכרים יוצרים איברי בולבוס כשהם מתבגרים. אם כן, כיצד עכבישים מתפתחים, ובפרט, כיצד איבר הבולבוס

רגלי בחנין (Pedipalps)

גפיים מיוחדות דמויות רגליים שנמצאות בעכבישים, בעקרבים ובקרוביהם. אצל עכבישים, רגלי בחנין משמשות למטרות רבות, כמו למשל חישת הסביבה והעברת זרע.

איבר בולבוס (Bulbus Organ)

איבר מיוחד ברגלי הבחנין של עכבישים זכרים שמשמש להעברת זרע במהלך ההזדווגות.

פרוקי רגליים (Arthropods)

קבוצת חיות שכוללת עכבישים, עקרבים, קרדיות, קרציות, נדלים, סרטנים וחרקים. פרוקי רגליים מאופיינים על ידי השכבה החיצונית הקשה וריבוי (אנתרו-) הגפיים (-פוד).

קוטיקולה (Cuticle)

השכבה החיצונית הקשה של פרוקי רגליים, שנקראת גם אקזוסקלטון (שלד חיצוני).

השלה (Molting)

תהליך של השלכת הקליפה החיצונית הקשה כדי לגדול.

נוצר? עכבישים מתפתחים תחילה בתוך ביצים שהאימהות שלהם הטילו בקן. כשהם בוקעים מהביצים האלה, העכבישונים קטנים ושבריריים מאוד. העכבישונים נראים דומה מאוד להוריהם, אולם הם צריכים לגדול הרבה. גדילה אינה קלה לעכבישים, מאחר שבדומה לפרוקי רגליים אחרים יש להם כיסוי חיצוני. הכיסוי הזה נקרא **קוטיקולה** (או אקזוסקלטון, שלד חיצוני) והוא מגן על העכביש, ממש כמו המגן הנוצץ של אביר. כמו העצמות שלנו, הקוטיקולות הקשות נותנות לעכבישים את הצורה שלהם, ונושאות את המשקל שלהם. לרוע המזל עבור העכביש, הקוטיקולה לא יכולה להתרחב, ולכן היא צריכה להיות מושלת כדי לאפשר את הגדילה ואת שינוי צורת הגוף. לכן, כאשר העכביש בונה קוטיקולה חדשה, היא צריכה להיבנות מעט גדולה, כך שיהיה מקום לגדילתו ולשינוי גופו של העכביש להתרחש בתוכה. בנקודה מסוימת, העכביש יוצא מהקוטיקולה הישנה שלו ומנפח את עצמו לגודל החדש שלו לפני שהוא מקשה את הקוטיקולה החדשה הגדולה יותר. התהליך השלם הזה נקרא **השלה**, והוא מתרחש כמה פעמים בחייו של העכביש. רק לקראת סוף גדילתו של העכביש מתחיל להתפתח איבר הבולבוס בתוך רגלי הבחנין.

מדענים הסתקרנו במשך שנים מהעובדה שהמבנה המורכב של איבר הבולבוס של הזכר יכול להתפתח בתוך הקוטיקולה בלי להפריע לחיים הנורמליים של החיה. אולם מה בדיוק קורה בתוך רגלי הבחנין?

מה אנו יכולים לראות מבחוץ?

כדי להבין כיצד איבר בולבוס נוצר, מדענים ראשית חקרו מה אפשר לראות בחלק החיצוני של הקוטיקולה של רגלי הבחנין של הזכר. אחרי בקיעתם מהביצים, עכבישונים זכרים ונקבות נראים תחילה אותו הדבר מאחר שרגלי בחנין של עכבישים זכרים קטנים עדיין לא מכילות את איבר הבולבוס (2 איור, משמאל למעלה). לאחר השלה של העכבישונים האלה כחלק מהפיכתם לעכבישים זכרים בוגרים, רגלי הבחנין לפתע מתעבות בקצוות ונראות קצת כמו בלון מנופח (2 איור, באמצע למעלה). לבסוף, אחרי השלה נוספת העכביש המתבגר נעשה עכביש זכר בוגר. הבלון שבקצה רגלי הבחנין נהפך לאיבר הבולבוס הכהה והמורכב. אף על פי שאנו יכולים לראות בקלות שינויים בגודל של רגלי הבחנין כאשר העכביש מתפתח, תהליכי ההתפתחות ההכרחיים שמתמירים את ה"בלון" לאיברי בולבוס מורכבים, אינם נראים מבחוץ. זו הסיבה לכך שבמשך שנים רבות אף אחד לא ממש ידע איך איבר הבולבוס נוצר בתוך רגלי הבחנין, ומהיכן הגיעו התאים והרקמות שבונים את המבנה הזה.

כיצד אנו מסתכלים דרך הקוטיקולה?

הקוטיקולה של רגלי הבחנין המותמרות אינה רק קשה, אלא גם בלתי שקופה. לכן, היינו צריכים להשתמש בתכסיסים מסוימים כדי לראות את מה שקורה בפנים. ראשית, השתמשנו בפרוקסיד מימן כדי להלבין את הקוטיקולה. אתם עשויים לדעת שהלבנה יכולה ליצור אזורים לבנים על גינסים כהים או ליצור פסים בלונדיניים בשיער כהה. שתי הדוגמאות האלה נסמכות על תהליך ההלבנה שמסיר את צבעי הפיגמנט. השתמשנו באותו האפקט כדי להסיר את כל הצבע הכהה מהקוטיקולה, מה שהפך אותה לשקופה.

איור 2

התפתחות של

איבר הבולבוס. שורות

עליונות ואמצעיות: רגלי

הבחנין שנושאות את איבר

הבולבוס המתפתח מודגשות

על ידי העיגול האדום והמוגדל

בציור שמתחת לכל תמונה.

אתם יכולים לראות שרגלי

הבחנין של הזכר המתבגר

(באמצע) גדלות, אולם לא

נמצאים מבנים חיצוניים

מורכבים. אצל הזכר הבוגר

(מימין), איבר הבולבוס נוצר

במלואו ומכיל פיגמנטציה

כהה. בשורות התחתונות

(A-F): מבט פנימי של

התפתחות איבר הבולבוס אצל

עכבישונים ואצל עכבישים

זכרים מתבגרים. הקוטיקולה

הולבנה והרקמה נוקתה כך

שהתמונות התלת-ממדיות

יכלו להיבנות מחדש מתמונות

שנלקחו באמצעות מיקרוסקופ

לייזר סורק קונפוקאלי. האזור

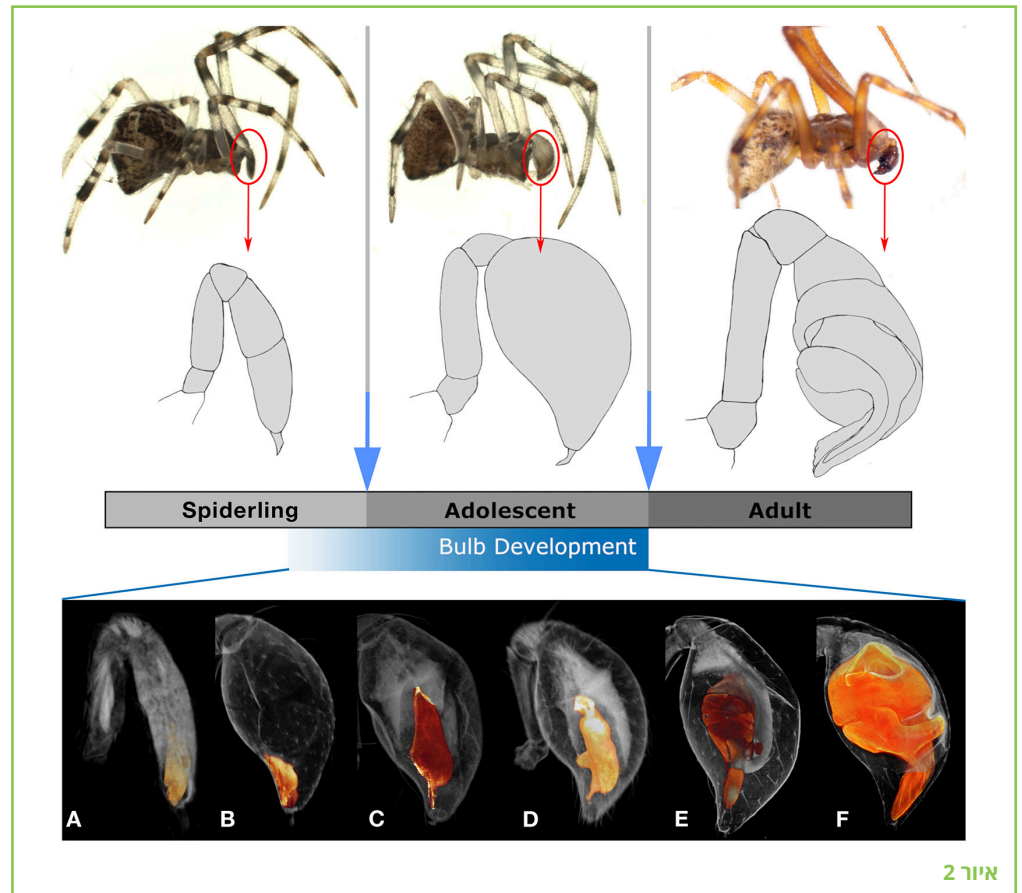
של רגלי הבחנין שיהפוך

לאיבר בולבוס מסומן בכתום.

האיור הוא נגזרת מ- של

Quade et al. (2019) תחת

רישיון זכויות יוצרים.



איור 2

אולם עדיין לא היינו מסוגלים לראות בבירור את המבנים המתפתחים שבתוך הקוטיקולה, מאחר שהתמונות שצילמנו היו מטושטשות מדי. הסיבה לכך היא, שכמו רוב הרקמות, גם רגלי הבחנין מכילות תערובת של חומרים, לדוגמה מים וטיפות שומן זעירות. כאשר האור "מטייל" דרך חומרים שונים, הוא מתכופף ומתפזר, מה שגורם לתמונות שנלקחות על ידי מצלמת המיקרוסקופ להיות מטושטשות. ייתכן שחוויתם את תכונות האור האלה בחיי היומיום שלכם. כשאתם למשל שמים מקל בתוך מים הוא נראה מכופף. במקרה הזה האור מתכופף מהגבול שבין המים לאוויר בדרכו לעין שלכם. זה דומה למה שקורה עם ערפל. ערפל הוא פשוט אוויר שמכיל הרבה טיפות מים זעירות. בשל כל טיפות המים בערפל, האור נעשה מכופף הרבה פעמים, ולכן אינכם יכולים לראות בצורה טובה את מה שנמצא מאחורי הערפל.

אם כן, עבור הטריק השני שלנו, אנו צריכים להסיר את ה"ערפל" ברקמה עם שיטה שנקראת ניקוי רקמות. כדי לנקות את הרקמה ברגלי הבחנין היינו צריכים להחליף או את טיפות השומן או את טיפות המים עם חומר אחר. בחרנו להחליף את המים עם כימיקל שמכיל תכונות אור דמויות שומן שנקרא מתיל סליצילט, כך שהאור יכול לנוע דרך הרקמה בלי להתפזר, מה שנותן לנו תמונה ברורה.

פריסה ללא חיתוך

ברגע שהלבנו את הרקמה והפכנו אותה לשקופה, וגם החלפנו את המים, היינו מוכנים לצלם את איבר הבולבוס המתפתח בתוך רגלי הבחנין. כדי לעשות זאת, השתמשנו במיקרוסקופ

מיקרוסקופ לייזר סורק קונפוקאלי (Confocal laser scanning microscope)

מיקרוסקופ מורכב שמשמש במראות, בחורים ובאלומות אור דקות – לייזרים. אלומות הלייזר יכולות לסרוק דגימה ברמות שונות של ייצור תמונות דו-ממדיות שונות בחולוציה גבוהה. כל התמונות הדו-ממדיות האלה יכולות לאחר מכן להיות מחושבות יחד כדי לתת תמונות תלת-ממדיות חדות מאוד של רקמות מורכבות.

מיוחד שנקרא **מיקרוסקופ לייזר סורק קונפוקאלי**, אשר משתמש בלייזרים מיוחדים כדי לצלם תמונות במקום להשתמש באור לבן מנורות רגילות. הלייזרים האלה הם אלומות אור דקות במיוחד שיכולות להיות מרוכזות על אזור מסוים מאוד של רגלי הבחנין. השתמשנו בשיטה הזו כדי לצלם תמונות רבות, ברמות שונות, החל מהתחתית ועד לחלק העליון של הדגימה. כל תמונה כזו נקראת פרוסה, מאחר שזה כמו לקחת פרוסה מהדגימה ולצלם את המשטח שנלקח. הפרוסות האלה יכולות להתחבר יחד על גבי מחשב, מה שבסופו של דבר בונה מחדש את התמונות התלת-ממדיות של רגל הבחנין כולה.

בתמונות רגל הבחנין התלת-ממדיות האלה אנו יכולים לסמן את כל המבנים השונים על כל פרוסה, כך שנוכל להדגיש את המבנים בצבעים שונים על השחזור התלת-ממדי (איורים 2A-F). הסימון הזה מאפשר לנו להבין כיצד נוצר איבר הבולבוס, כל זה בלי שאי פעם חתכנו את הדגימה! האם זה לא מדהים?

מה נדרש ליצירת ספיידרמן? כמה הפתעות

השימוש בשיטות המתקדמות האלה חשף כמה הפתעות. ראשית, מצאנו שההתפתחות של איבר הבולבוס של העכבישונים מתחילה עוד לפני ש"בלון" הקוטיקולה מתנפח (איור 2A). בעכביש המתבגר, הבלון מכיל מבנה קטן על החלק העליון שלו (איורים 2B-F) שגדל ויוצר קיפולים מורכבים בזמן שהוא מתפתח לצורתו הסופית בתוך ה"בלון". ההפתעה הנוספת הייתה שהמבנים האחרים בקצה רגלי הבחנין שלא שייכים לאיבר הבולבוס גם נבנו מחדש.

בדרך כלל, מבנים גדלים בעכבישים על ידי עיצוב מחדש של הרקמה שנמצאת ממש מתחת לקוטיקולה. לכן, זה היה מפתיע מאוד להבין שמבני רגלי הבחנין האחרים האלה נוצרו חדשים לגמרי, באמצעות תהליך שעדיין איננו מבינים לגמרי. ראינו שמיד לאחר ההשלה "בלון" הקוטיקולה היה ריק פרט להתפתחות של מבני איבר הבולבוס, אולם אחרי זמן מה החומר החדש הופיע ובנה מחדש את המבנים האחרים בקצה רגלי הבחנין (איור 3). החומר הזה הכיל צבירים מסוימים של תאים בתוכו, אולם לא נראה היה שהוא מורכב מהתאים האלה.

מסקנות

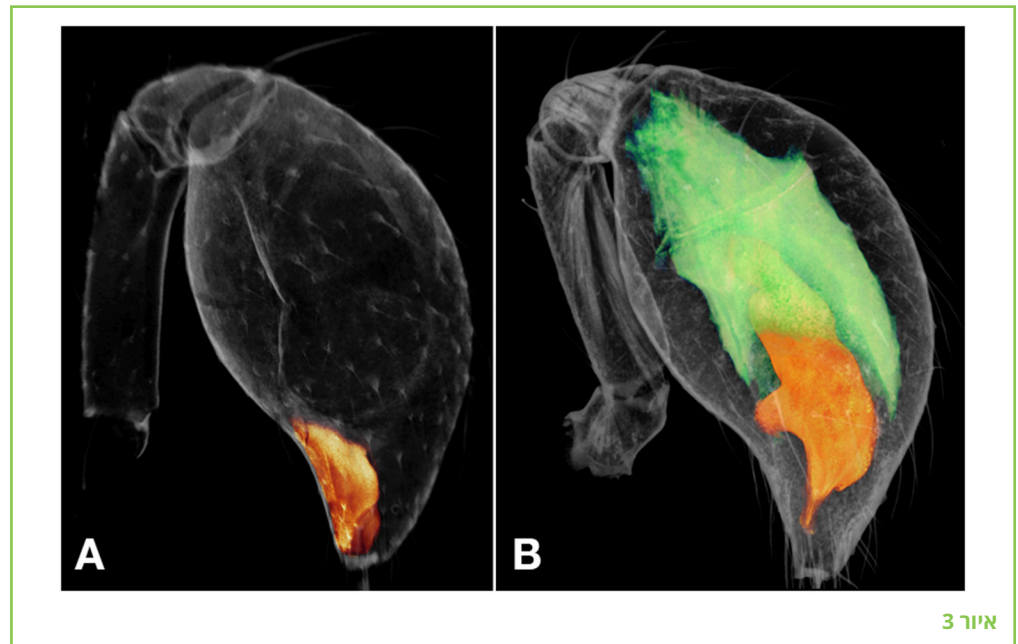
אף על פי שעכבישים וחרקים לא מאוד דומים זה לזה, שניהם שייכים למשפחת פרוקי רגליים וצריכים לנהל התפתחות לאורגניזם בוגר בתוך קוטיקולה חיצונית קשה. חלק מהחרקים פתרו את הבעיה הזו בצורה מעניינת. אתם ככל הנראה מכירים את הספר "הזחל הרעב". הזחל ראשית הופך לגולם סטטי, ואז לבסוף בוקע כפרפר. התהליך הזה נקרא **מטמורפוזת**. במהלך התהליך הזה הרבה אזורי גוף של הזחל "מומסים" ואז מאורגנים מחדש כדי ליצור את איברי הגוף של פרפר בוגר. חרקים ועכבישים אחרים לא משתמשים בשלב גולם סטטי כזה, והם צריכים לגדול ולפתח את כל המבנים בתוך הקוטיקולה שלהם, בלי להפריע לתפקוד של איברי הגוף החיצוניים שלהם. אף אחד לא ידע כיצד עכבישים, וככל הנראה פרוקי רגליים אחרים, מבצעים התמרות מדהימות כאלה של רקמות מתחת לקוטיקולה שלהם בלי שהם מוגנים כגולם. חקר ההתפתחות של איבר הבולבוס של זכר עכביש ושימוש בכמה תכסיסים, סייעו לנו לפתור את התעלומה הזו. הממצאים שלנו מצביעים על כך שהחומר שמשמש להתפתחות המבנים יכול להיות מופרד הציידה בשלב מוקדם מאוד בהתפתחות, הרבה לפני שהמבנה

מטמורפוזת (Metamorphosis)

תהליך של שינוי דרמטי שמתרחש במהלך חייהן של חלק מהחיות, כמו למשל פרפרים, אשר נולדים כזחלים.

איור 3

ייצוג תלת-ממדי מפורט יותר של איבר הבולבוס המוקדם וההתפתחות של רגלי הבחנין כפי שמוצג באיורים 2B,D. המבנים שהופכים לאיבר הבולבוס מוצגים בכתום, בעוד שמבנים אחרים בקצה רגלי הבחנין שגם נבנים מחדש בתוך הקוטיקלה מוצגים בירוק. האיור הוא נגזרת של Quade et al. (2019). תחת רישיון זכויות יוצרים.



איור 3

נמצא בחוץ. נוסף על כך מצאנו שתהליכי המסה וארגון מחדש המוכרים מחרקי מטמורפוזת יכולים גם להתרחש במהלך התפתחות העכביש, ללא ההתמרה למצב של גולם. הממצא הזה מרתק ביותר. אנו מסוקרנים מאוד לזהות את המקור ואת הטבע של החומר הזה, וכיצד התאים שמצטברים בחומר הזה מארגנים אותו מחדש.

מאמר המקור

Quade, F. S. C., Holtzheimer, J., Frohn, J., Töpperwien, M., Salditt, T., and Prpic, N. M. 2019. Formation and development of the male copulatory organ in the spider *Parasteatoda tepidariorum* involves a metamorphosis-like process. *Sci. Rep.* 9:6945. doi: 10.1038/s41598-019-43192-9

פורסם אונליין: 20 באפריל 2022

נערך על ידי: Alistair P. McGregor

מנחה מדעי: Kirsty Salmon

ציטוט: Quade FSC and Turetzek N (2022) תהליך ההפיכה ל"ספיידרמן". *Front. Young Minds.* doi: 10.3389/frym.2020.00083-he

תורגם והותאם: Quade FSC and Turetzek N (2020) The Process of Becoming a "Spider-Man". *Front. Young Minds* 8:83. doi: 10.3389/frym.2020.00083

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

Quade and Turetzek 2022 © 2020 © **COPYRIGHT** 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.

סוקר צעיר

JAMES, גיל: 11

אני ילד בן 11 שאוהב לקרוא. השיעורים האהובים עליי בבית הספר הם קלאסיקה והיסטוריה. התחביבים האחרים שלי הם איסוף אבנים ומאובנים עבור המוזיאון שלי, ועריכת תחרויות עם אוסף ה-Hot Wheels שלי.



הכותבים

FELIX SIMON CHRISTIAN QUADE

כבר כילד קטן, דוקטור Felix Quade היה מרותק ממגוון הצורות בטבע, ומהאופן שבו הן התפתחו. הוא תמיד התעניין באופן שבו דברים עובדים ורצה להסתכל לתוכם. אחרי בית הספר, הוא למד ביולוגיה ברוסטוק, ובתזה שלו הוא עבד על טופרים של סרטני הרמיט וקרוביהם באמצעות שיטה שנקראת טומוגרפיית מחשב. הוא עשה את הדוקטורט שלו בגוטינגן ועבד על התפתחות של מורפולוגיה (חקר הצורה) בוגרת של איבר בולבוס של עכבישים. כעת הוא משתמש בסונים שונים של מיקרוסקופים ושל דימות רנטגן כדי להסתכל בתוך חיות, ומשתמש במחשבים כדי להפוך לנראה את מה שאחרת הוא בלתי נראה. *felix.quade@allzool.bio.uni-giessen.de



NATASCHA TURETZEK

דוקטור Natascha Turetzek תמיד התעניינה בהתפתחות של חיות והאופן שבו אורגניזם בוגר יכול להיווצר מתא בודד יחיד. לכן, היא עשתה את הדוקטורט שלה בביולוגיה אבולוציונית התפתחותית, וביצעה ניתוחים השוואתיים של התפתחות עוברית בעכבישים ובחרקים שונים. כעת היא מנהלת מעבדה ב-LMU במינכן, ועובדת על אבולוציה והתפתחות של איברי חושים בקרב פרוקי רגליים שונים. *zhang@bio.lmu.de



מוזיאון המדע ע"ש בלומפילד ירושלים
متحف العلوم على اسم بلومفيلد القدس
Bloomfield Science Museum Jerusalem



הוצאת פרונטיר מדע לצעירים ישראל
Hebrew version provided by



THE SAGOL NETWORK