



שיתוף אלקטרונים: חברות יוצאת דופן בין חיידקים

Julia M. Otte^{1,2,3*}

¹קבוצת מחקר משותפת הלמהולץ-מקס פלנק לאקולוגיה ולטכנולוגיה של עומק הים, מכון אלפרד ווגנר מרכז הלמהולץ לחקר הקוטב והים, ברמהייבן, גרמניה

²קבוצת מחקר משותפת הלמהולץ-מקס פלנק לאקולוגיה ולטכנולוגיה של עומק הים, מכון מקס פלנק למיקרוביולוגיה ימית, ברמן, גרמניה

³המחלקה לגיאומיקרוביולוגיה, המרכז לגיאומדעים יישומיים, אוניברסיטת טובינגן, טובינגן, גרמניה

סוקרות צעירות

MARIANA

גיל: 15



ZARA

גיל: 14



האם ידעתם שברזל הוא אחד היסודות החשובים ביותר על כדור הארץ? משערים שהחיים התפתחו בסמיכות למקורות ברזל. משמעות הדבר היא שצורות החיים הקדומות ביותר היו מסוגלות להשתמש בברזל כדי לקבל אנרגיה, באופן שבו אנו משתמשים במזון. האורגניזמים הזעירים האלה נקראים "מיקרואורגניזמים של ברזל", והם יכולים להופיע במשקעים – בעיקר בחול בוצי. מה שהיה פחות ידוע הוא המקום שבו מיקרואורגניזמים של ברזל חיים במשקעים – האם הם ממוקמים קרוב לפני השטח של המים, או עמוק בתוך המשקעים? במחקר הזה, קבוצה מאוניברסיטת טובינגן חקרה את התפוצה והמגוון של מיקרואורגניזמים של ברזל, וגילתה כי מיקרואורגניזמים אלה חיים ללא תלות במזונות האהובים עליהם: ברזל, חמצן ואור! את העצמאות הזו אפשר להסביר על ידי חברות יוצאת דופן ובלתי צפויה עם "כבל חי". במאמר זה נגלה למה הכוונה.

האם ידעתם שחלק מהחיידקים יכולים "לאכול" ברזל?

מיקרואורגניזמים הם צורות חיים מיקרוסקופיות שכוללות חיידקים, ארכיאות, פטריות, אצות, פרוטוזואונים ווירוסים. מחקר זה מתמקד בחיידקים. חיידקים חיים בבטנו ועל גבי עורנו, אך גם בכל מקום אחר: מהחלקים העמוקים ביותר של קרום כדור הארץ ועד לעננים, ואפילו מצליחים לחיות מתחת לקרח של אנטרטיקה או במעיינות חמים. כפית אחת של **משקעים ימיים** מכילה יותר ממיליארד חיידקים! אף על פי שחיידקים הם קטנים מאוד, ישנם כל כך הרבה מהם, שנודעת להם השפעה אדירה על הסביבה שלנו.

כדי לשרוד בסביבות מגוונות, מיני חיידקים התפתחו כך שיוכלו "לאכול" דברים שונים על מנת לקבל את האנרגיה שהם צריכים להישרדות. החיידקים במחקרנו אוהבים ברזל! חיידקים אלה נפוצים בסביבתנו. אחרי חמצן, סיליקון ואלומיניום, ברזל הוא אחד היסודות השכיחים ביותר על כדור הארץ. חיידקי ברזל היו חיוניים עבור תחילת החיים על כדור הארץ, ועשויים גם להיות חשובים על כוכבי לכת מכילי-ברזל אחרים, כמו למשל מאדים.

חיידקי ברזל יכולים להשתמש בברזל כדי ליצור אנרגיה עבור גדילתם, ובכך הם מייצרים תוצרי פסולת בצורת מינרלים חומים של ברזל [1], שמקרים בתור חלודה. עד כה, שלוש קבוצות של חיידקי ברזל נמצאו כיוצרות מינרלים של ברזל: קבוצה אחת תלויה באור – החיידקים זקוקים לאור כדי לשרוד, הקבוצה השנייה תלויה בחמצן והקבוצה השלישית תלויה בחנקן [1].

חלק מחיידקי הברזל חיים במשקעי חוף, בעיקר חול בוצי. משקע חוף טיפוסי בדרך כלל מורכב משכבות שעוקבות אחרי **גרדיאנטים גיאוכימיים** [2] (איור 1). בשכבות העליונות של המשקע, שאור השמש מגיע עליהן, ניתן לאתר חמצן והרבה חומרים אורגניים. בשכבות העמוקות יותר של המשקע יש פחות אור וחמצן, אולם עדיין אפשר למדוד מעט חנקן (ניטריט), חומרים אורגניים, ברזל, מינרלים של ברזל וּגְפָרָה (סולְפָט). שכבות אלה נוצרות בעיקר על ידי העדפות המזון של חיידקי משקעים שונים שנמצאים בכל אחת משכבות המשקע.

כיצד חיידקים מקבלים אנרגיה ממזון?

כדי להסביר את ממצאי המחקר, ראשית אנו צריכים לפרט על התהליך שדרכו חיידקים מקבלים אנרגיה מהמזון הנבחר שלהם. ברמה התאית, כל היצורים החיים, כולל חיידקים, עוברים תהליך של **נשימה תאית** כדי לייצר את האנרגיה שהם צריכים עבור גדילה. ברמה המולקולרית הקטנה ביותר, התהליך מערב החלפה של אלקטרונים, שהם הפיסות הקטנות של אטום שיש להן מטען חשמלי שלילי. בעיקרון, מקור מזון אחד לחיידקים נקרא **תורם אלקטרונים**, ומקור אחר נקרא **מקבל אלקטרונים**. בעוד שתורמי אלקטרונים טיפוסיים במשקעים הם ברזל מסיס או חומרים אורגניים, למשל מאורגניזמים מתים, מקבלי אלקטרונים טיפוסיים הם חמצן, חנקן, או מינרלים של ברזל (איור 1). ההתפרקות של חומרים אורגניים באמצעות חמצן מספקת את כמות האנרגיה הגדולה ביותר, וכתוצאה מכך בדרך כלל נעשה שימוש קודם כל בכל החמצן, אחריו חנקן ולבסוף מינרלים של ברזל [2].

מיקרואורגניזמים

(Microorganism)

צורות חיים זעירות שאפשר לראותן רק באמצעות מיקרוסקופ. כוללות חיידקים, ארכיאות, פטריות, אצות, פרוטוזואונים ווירוסים.

משקע ימי

(Marine Sediment)

חלקיקי אבן ואדמה שמועברים מאזורי חוף לאוקיינוס על ידי רוח, קרח ונהרות, כמו גם השאריות של אורגניזמים ימיים.

גרדיאנט גיאוכימי

(Geochemical Gradient)

ההבדל בין שתי מחלקות (שכבות עליונות ועמוקות של משקעים, במקרה שלנו) בהקשר לכמות החומר כמו חמצן או אור, או הטמפרטורה, הלחץ, או ריכוז המלח.

נשימה תאית

(Cellular Respiration)

התהליך שכל היצורים החיים משתמשים בו כדי ליצור את האנרגיה שהם זקוקים לה כדי לחיות. תהליך זה מערב העברה של אלקטרונים מתורם אלקטרון (תרכובת עם אנרגיה גבוהה) למקבל אלקטרון (תרכובת עם פחות אנרגיה), מה שגורם לשחרור אנרגיה.

תורם אלקטרונים

(Electron Donor)

חומר כימי שמשחרר אלקטרונים לתרכובות אחרות במהלך חצי תגובה של נשימה תאית. לדוגמה, חומרים אורגניים או ברזל.

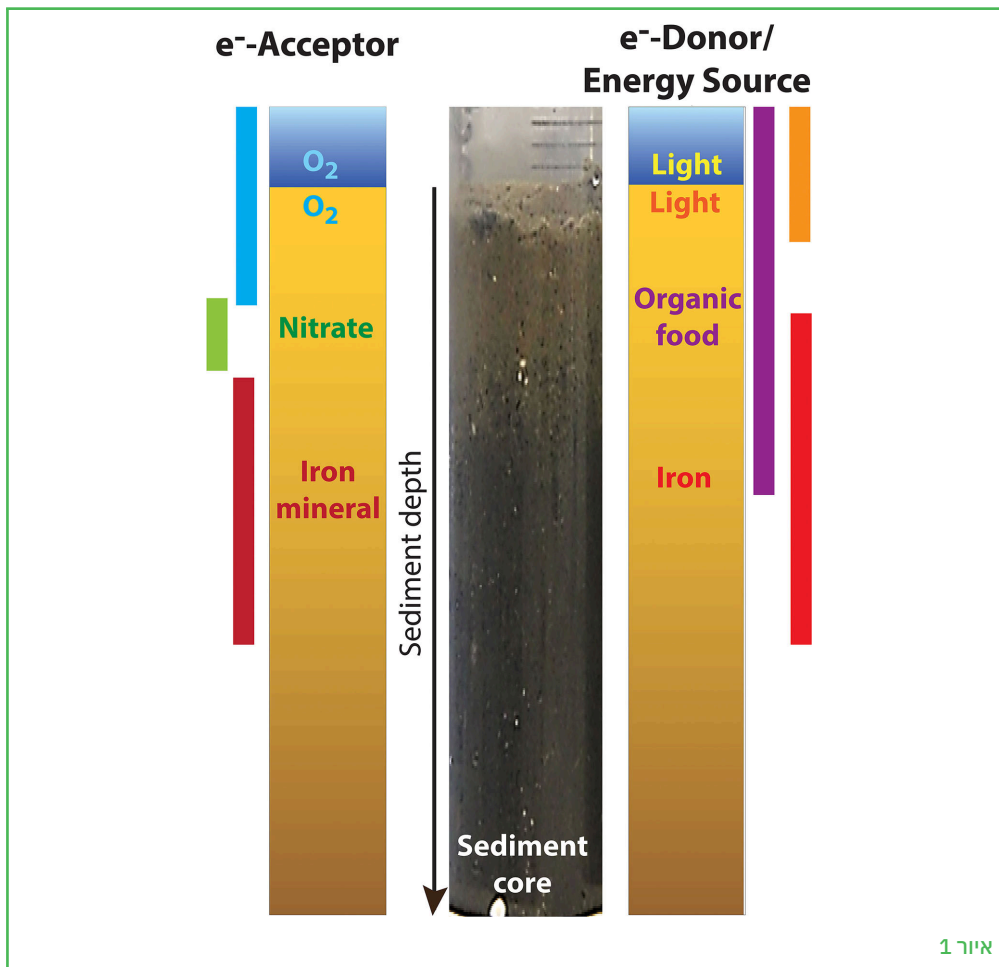
מקבל אלקטרונים

(Electron Acceptor)

חומר כימי שמקבל אלקטרונים המועברים אליו מתרכובת אחרת במהלך חצי תגובה של נשימה תאית. לדוגמה, חמצן, חנקן, גפרור ומינרלים של ברזל.

איור 1

גרדיאנטים גיאוכימיים של משקעים ימיים. מבנה השכבות של משקעי חוף טיפוסיים מוצג עם ליבת משקעים אמיתית שמכילה משקעי חוף ימיים מהחוף הדני (Norsminde Fjord, דנמרק) שמוצגת במרכז. השכבה העליונה היא חומה מהמזון האורגני, והשכבה העמוקה יותר שחורה מהמינרלים של הברזל. הנוכחות של מקבלי אלקטרונים ותורמי אלקטרונים בשכבות המשקע מוצגת משמאל לליבה, עם המיקום הכללי של חומרים שונים בגרדיאנט שמסומן על ידי הקווים הצבעוניים. בשכבות העליונות של המשקע מתרחשות תגובות שתלויות באור, בחמצן ובמזון אורגני, בעוד שבאזורים נמוכים יותר במשקע התהליך תלוי בחנקן, בברזל ובמינרלים של ברזל, e^- , אלקטרונים; O_2 , חמצן.



עד כה, אנו יודעים שחיידקי ברזל, כמו כל האורגניזמים האחרים, זקוקים לתגובה של העברת אלקטרון כדי לקבל אנרגיה. חיידקי ברזל מקבלים אלקטרונים מברזל (תורם האלקטרון) ונותנים אלקטרונים לחמצן (מקבל האלקטרון) [1]. העברת האלקטרונים הזו מברזל לחמצן מאפשרת לחיידקים לקבל אנרגיה עבור גדילתם. זה מראה כמה חיידקים באמת חכמים: הם משתמשים בהפרשי האנרגיה של האלקטרונים בברזל ובחמצן כדי לייצר אנרגיה. אפשר לדמות זאת כך: האלקטרונים מברזל, עם פוטנציאל אנרגטי גבוה, נופלים למטה אל החמצן, עם הפוטנציאל הנמוך יותר, כמו מפל טבעי. בתהליך הזה, חיידקי ברזל יכולים להפעיל את הטורבינות שלהם, כמו תחנת כוח הידרואלקטרית, ולייצר אנרגיה. עבור חיידקי ברזל, העברת האלקטרון מתרחשת בממברנת התא, שם הם מייצרים את מינרלי הברזל. חשוב לציין, שממברנה זו מצוידת במכשור ביוכימי מיוחד (שנקרא חוטים) כדי להעביר אלקטרונים לאורך ממברנות התא שלהם [3]. תגובת העברת האלקטרון של חיידקי ברזל מורכבת הרבה יותר, ולכן שונה, בהשוואה לחיידקי משקעים אחרים ולאורגניזמים אחרים.

התפלגות בלתי צפויה של חיידקי ברזל במשקעי חוף

עד לאחרונה, ההתפלגות הטבעית של חיידקי ברזל בשכבות של משקעי חוף הייתה בלתי ידועה. לכן, מצוידים במגפי גומי, בכפפות, בדליים, בבקבוקים ובמזרקים, חוקרים מקבוצת מחקר באוניברסיטת טובינגן בילו שלוש שנים באיסוף דגימות משקעים שונות על חוף הים

הבלטי בדנמרק, במטרה לחקור התפלגות של חיידקי ברזל במשקעי חוף טיפוסיים. הם ניתחו את סוגי החיידקים בדגימות ואת כמויות הברזל, החמצן והחנקן שנמצאו בחמשת הסנטימטרים העליונים של המשקע. בשכבת פני השטח של המשקע אותר חמצן שפחת בשכבות המשקע העמוקות יותר [4] (איור 2A). ציפיו לראות שגרדיאנט החמצן הזה גם יקבע את סוגי החיידקים שחיים בתוך כל שכבות המשקע. לאחר מכן, חיפשו את כל סוגי חיידקי המשקע שהיו תלויים באור ובחמצן. מרבית החיידקים האלה נמצאו חיים בפני השטח, ופחות מהם חיו במשקעים העמוקים יותר, באופן שתאם את ציפיותינו [4] (איור 2A).

אולם, כאשר מסתכלים בפרט על שלושת סוגי חיידקי הברזל, אפילו אלה שהיו תלויים בחומרים שנמצאים בשכבות פני השטח של משקע כמו חמצן, חנקן ואור השמש, הופתעו מאוד לגלות שכל שלושת הסוגים היו מעורבים באופן שווה בכל שכבות המשקעים [4] (איור 2B). המשמעות היא שחיידקי ברזל מתנהגים אחרת ממרבית חיידקי המשקעים, ולא מכוונים את עצמם בהתאם לגרדיאנט של חמצן, חנקן, או אור השמש כשהם בוחרים את האזור המועדף עליהם למחיה. לאור התוצאה המעניינת ניסינו להבין מדוע חיידקי ברזל מתנהגים אחרת מסוגי חיידקים אחרים, ויכולים לחיות בכל שכבות המשקעים.

כיצד אפשר להסביר את ההתפלגות הבלתי צפויה של חיידקי ברזל במשקעים?

כמה השערות יכולות להסביר את ההתפלגות של חיידקי ברזל לאורך שכבות של משקעים (איורים 3A-E).

(A) האם ייתכן שחיידקי הברזל מתערבבים דרך שכבות המשקע על ידי פעילות של תולעים או תנועות גלים? אנחנו לא נוטים להסכים עם ההשערה הזו, מאחר שערבוב צריך להשפיע על כל חיידקי המשקע, ולכן זה לא מסביר מדוע רק חיידקי ברזל נמצאו ברחבי כל השכבות.

(B) האם חיידקי ברזל יכולים להיות במצב "שינה" בחלק מהשכבות, בעודם נחים עד שתנאים טובים יותר יהיו זמינים? אם כן חיידקים אלה היו פעילים מאוד ולא "יָשְׁנוּ", ולכן ההשערה הזו לא יכולה להסביר את תבניות ההתפלגות של חיידקים לאורך המשקע.

(C) אולי חיידקי הברזל הם ניידים, ומסוגלים "לטייל" לאורך שכבות המשקע? היכולת לנוע אינה מאפיין מיוחד של חיידקי ברזל, אף על פי שחברים רבים בחברות משקעים הם ניידים.

(D) היש אפשרות שחיידקי ברזל יכולים להשתמש בבועות שמלאות בחמצן או בחנקן, בשכבות העמוקות יותר של משקעים בתור מקור מזון? הבועות הקטנות, המלאות בגז חמצן או במקורות מזון אחרים, לא יכולות להסביר את ההתפלגות של חיידקי ברזל בלבד. אם כן, גם ההשערה הזו נפסלה.

(E) האם חיידקי ברזל גמישים ביחס למקור המזון שלהם? שוב, תזונה גמישה לא יכולה להסביר את ההתפלגות של כל חיידקי הברזל השונים לאורך המשקע בלבד.

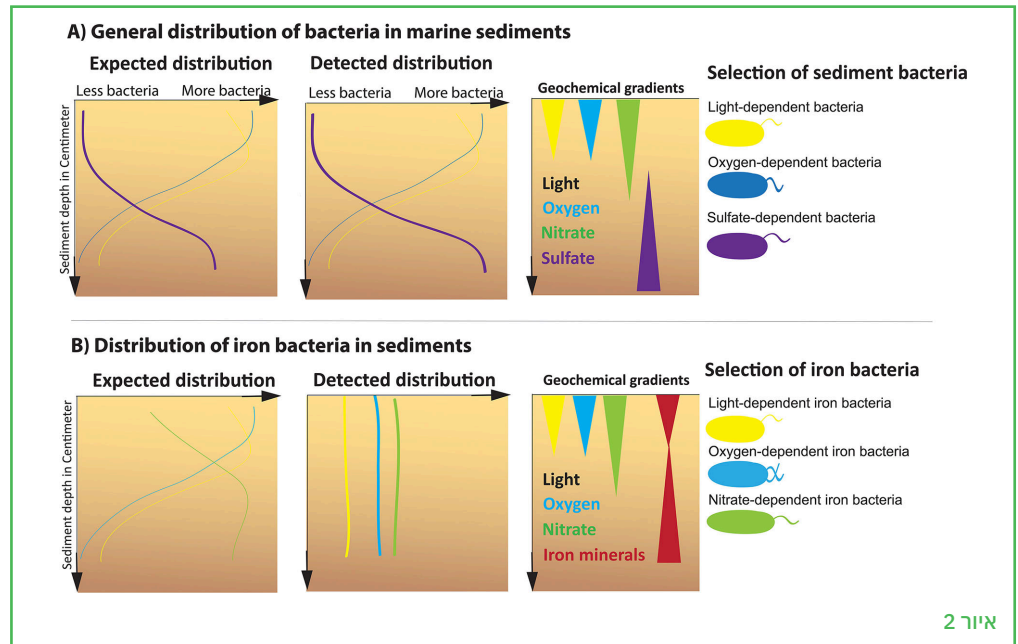
כאשר הבנו שההתנהגות של חיידקי ברזל לא יכולה להיות מוסברת על ידי אף אחת מההשערות האלה, היינו צריכים להמשיך לחקור. וזה נעשה יותר ויותר מעניין!

איור 2

ההתפלגויות הצפויה והנמדדת של חיידקים במשקעי חוף. (A) ציפנו שכאשר נתבונן על כל חיידקי המשקעים הטיפוסיים, נראה סוגים שונים של חיידקים (שמוצגים מימין) מפולגים בהתאם לגרדיאנטים של חומרים שהם זקוקים להם כדי ליצור אנרגיה (כלומר, כדור, חמצן ונפירה). הפאנל geochemical "gradients" (גרדיאנטים גיאוכימיים) מראה את הכמויות של החומרים שמסומנים על ידי המשולשים, כשהחלק הרחב מייצג ריכוזים גדולים יותר של החומר, והצטמצמות המשולש מייצגת הפחתה בריכוז. איתרנו שכ-75% מהחיידקים מכוונים בהתאם לגרדיאנטים. כאשר כמות חמצן ענקית זמינה, ניתן למצוא הרבה חיידקים שתלויים בחמצן, וכאשר פחות חמצן נמצא כמעט ולא ניתן לאתר חיידקים שתלויים בחמצן. (B) אך, כאשר הסתכלנו על שלושת סוגי חיידקי הברזל בלבד, מצאנו שהם לא עוקבים אחרי ההתפלגות הצפויה במשקע, ובמקום זאת הם נמצאים בכל רחבי שכבות המשקע.

חיידקי כבל (Cable bacteria)

חיידקים חוטיים שיכולים להעביר אלקטרונים למרחקים ארוכים, בסביבות חמישה סנטימטרים, בכבל הרב-תאי שלהם, לחבר בין תורמי אלקטרונים למקבלי אלקטרונים ולתפקד ככבלים חשמליים במשקעים.



איור 2

האם חיידקי הכבל ממלאים כאן תפקיד?

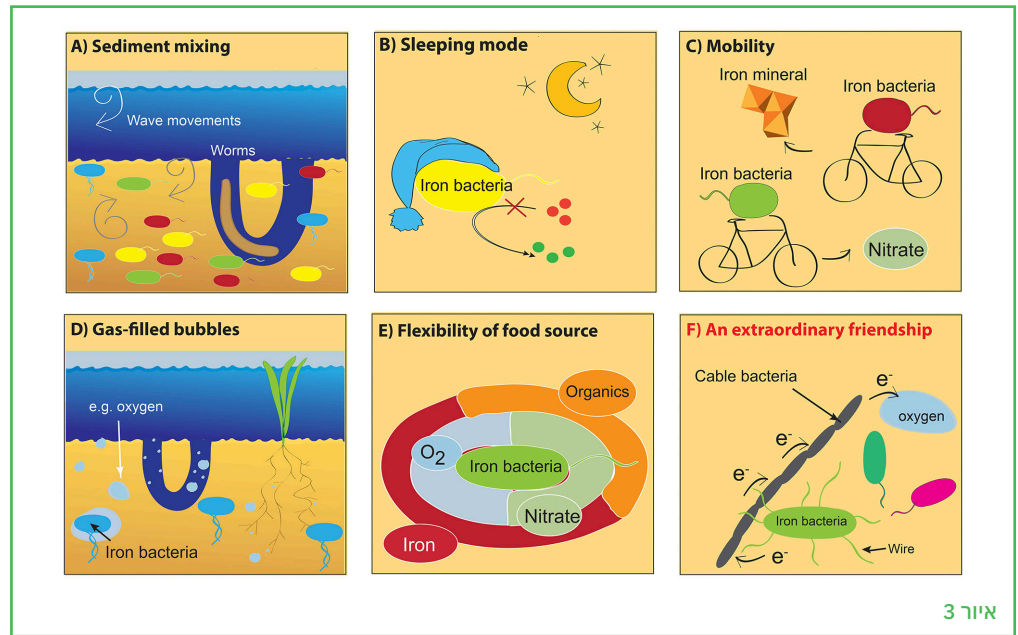
בשנת 2010, קבוצת מדענים מהמרכז לאלקטרו-מיקרוביולוגיה בדנמרק גילתה חיידקים חשמליים בלתי רגילים [5], שיש להם מבנה רב-תאי המכיל אלפי תאים בשורה. החיידקים יוצאי הדופן האלה נקראים **חיידקי כבל**. בניגוד לחיידקים אחרים, חיידקי כבל יכולים להעביר אלקטרונים למרחקים ארוכים, בסביבות חמישה סנטימטרים, בכבל הרב-תאי שלהם, ולתפקד ככבלים חשמליים במשקעים! לכן, ההשערה המסבירה את ההתפלגות של חיידקי ברזל לאורך המשקע עשויה להסתמך על חיידקי הכבל החשמלי. ואכן, חיידקי כבל וחיידקי ברזל חיו יחד באותן שכבות המשקע [4] (איור 3F). זכרו שחיידקי ברזל מצוידים במכשור ביוכימי מיוחד (שנקרא חוטים) על ממברנת התא שלהם, שמסייע להם למסור או לתפוס אלקטרונים [3]. באמצעותו, חיידקי ברזל יכולים להעביר אלקטרונים לחיידקי הכבל כשאין להם חמצן זמין כמקבל אלקטרונים! חיידקי הכבל יכולים לפעול בתור קולטי אלקטרונים עבור חיידקי הברזל, בעודם אוספים את האלקטרונים מחיידקי הברזל ומניעים אותם דרך הכבל אל פני השטח של המשקע. שם ישנו חמצן רב שיכול לפעול בתור מקבל אלקטרונים רגיל. הודות לחברות יוצאת הדופן עם חיידקי הכבל, חיידקי ברזל שנושמים חמצן יכולים לשרוד בכל שכבות המשקע, ללא תלות בחמצן שנמצא בשכבות המשקע שבהן הם חיים, ולהשתמש בחיידקי הכבל בתור סוג של **שְׁנוֹרָקָל!** חיידקי ברזל שתלויים בחנקה או באור יכולים גם הם לחיות ללא תלות במקורות המזון שלהם בכל שכבות המשקע (איור 3B), ככל הנראה באמצעות אותו המנגנון.

חברות מיקרובית יוצאת דופן

הקשר שבין חיידקי ברזל וחיידקי כבל צריך להיתמך על ידי ראיות נוספות כדי לאשר את החברות יוצאת הדופן הזו. עם זאת, באמצעות המחקר הזה כבר הראינו שחיידקי ברזל ככל הנראה משתמשים באסטרטגיה ייחודית כדי לשרוד בכל שכבות המשקע, ללא

איור 3

מדוע חיידקי ברזל התפלגו לאורך כל שכבות המשקע? חקרנו כמה סיבות אפשריות לכך שחיידקי ברזל לא עוקבים אחרי הגרדיאנטים במשקע: (A) ערבוב פיזי על ידי גלים או תולעים; (B) חיידקי ברזל "ישנים" ואינם זקוקים לחומרי מזון; (C) חיידקים אלה יכולים לנוע לאורך השכבות; (D) החיידקים יכולים למצוא בועות קטנות שמלאות בחמצן או בחנקן; (E) "מזונות" שונים; ו-(F) חיידקי ברזל מתקשרים עם חיידקי אלקטרונים. אף אחת מהסיבות (A) עד (E) לא יכולה להסביר את ההתפלגות. במקום זאת, אנו מציעים שחיידקי ברזל יכולים להשתמש בחיידקי כבל, כלומר במקבלי האלקטרונים. זה מאפשר לחיידקי ברזל לחיות ללא תלות בגרדיאנטים הגיאוכימיים של חמצן לדוגמה, הודות לסיוע של חברה – חיידקי הכבל. e^- , אלקטרונים; O_2 , חמצן.



איור 3

תלות בנוכחות מקור המזון הבסיסי שלהם! חיידקי ברזל משתמשים ביכולתם המיוחדת להעביר אלקטרונים על פני ממברנות התא שלהם – יכולת שאינה קיימת במרבית החיידקים האחרים - ומסוגלים לתקשר עם חיידקי הכבל. החברות יוצאת הדופן בין שני סוגי חיידקים אלה יכולה להסביר את ההתפלגות יוצאת הדופן של חיידקי ברזל במשקעים ימיים. להתפלגות זו ולקשר הבלתי צפוי בין חיידקי הברזל לחיידקי הכבל לאורך כל שכבות המשקע יש גם השפעה חיובית על החברה המיקרובית כולה, מאחר שחיידקי ברזל יכולים לחיות בשכבות עמוקות יותר של המשקע ללא תלות, למשל, באור ובחמצן, ויכולים לסייע לאורגניזמים אחרים בייצור מינרלי הברזל שלהם. לדוגמה, חומרים רעילים יכולים להידבק למינרלים של ברזל ואז אינם מזיקים יותר לאחרים. כך, לחברות חיידקית מפתיעה עשויות להיות השפעות חיוביות על המערכת האקולוגית. אמנם כדי להבין את הקשר המדויק הזה נדרש מחקר נוסף, אך מדענים למדו ששיתוף פעולה, אפילו בסדר גודל קטן כשל חיידקים, יכול לסייע לאורגניזמים לשרוד ולהרוויח באופן הדדי.

מאמר המקור

Otte, J. M., Harter, J., Laufer, K., Blackwell, N., Kappler, A., and Kleindienst, S. 2018. The distribution of active iron cycling bacteria in marine and freshwater sediments is decoupled from geochemical gradients. *Environ. Microbiol.* 20:2483–99. doi: 10.1111/1462-2920.14260

מקורות

1. Weber, K. A., Achenbach, L. A., and Coates, J. D. 2006. Microorganisms pumping iron: anaerobic microbial iron oxidation and reduction. *Nat. Rev. Microbiol.* 4:752–64. doi: 10.1038/nrmicro1490

2. Canfield, D. E., and Thamdrup, B. 2009. Towards a consistent classification scheme for geochemical environments, or, why we wish the term 'suboxic' would go away. *Geobiology* 7:385–92. doi: 10.1111/j.1472-4669.2009.00214.x
3. Reguera, G., McCarthy, K. D., Mehta, T., and Nicoll, J. S. 2005. Extracellular electron transfer via microbial nanowires. *Nature* 435:1098–109. doi: 10.1038/nature03661
4. Otte, J. M., Harter, J., Laufer, K., Blackwell, N., Kappler, A., and Kleindienst, S. 2018. The distribution of active iron cycling bacteria in marine and freshwater sediments is decoupled from geochemical gradients. *Environ. Microbiol.* 20:2483–99. doi: 10.1111/1462-2920.14260
5. Pfeffer, C., Larsen, S., Song, J., Dong, M., Besenbacher, F., Meyer, R. L., et al. 2012. Filamentous bacteria transport electrons over centimetre distances. *Nature* 491:218–21. doi: 10.1038/nature11586

פורסם אונליין: 30 בנובמבר 2022

נערך על ידי: Sanae Chiba

מנחה מדעי: Alejandra Hernandez-Santana

ציטוט: Otte JM (2022) שיתוף אלקטרונים: חברות יוצאת דופן בין חיידקים. *Front. Young Minds*. doi: 10.3389/frym.2020.543259-he

תורגם והותאם מ: Otte JM (2020) Sharing Electrons: An Extraordinary Friendship Between Bacteria. *Front. Young Minds* 8:543259. doi: 10.3389/frym.2020.543259

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

© 2020 © Otte 2022. 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.

סוקרות צעירות

MARIANA, גיל: 15

היי! קוראים לי Mariana ואני בת 15. אני אוהבת לקרוא ספרים, לבלות זמן עם חיות ולשחות. אני מאמינה שכל יום מביא עימו הזדמנויות עבורי ללמוד משהו חדש, ולהיות שמחה.



**ZARA, גיל: 14**

קוראים לי Zara ואני בת 14. בזמני הפנוי אני נהנית לקרוא, לסייע לקהילה שלי ולשחק כדורעף. אני חושבת שחשוב לעבוד קשה במטרה להגשים את חלומותינו, ולהיות אדם טוב יותר בכל יום.

הכותבת**JULIA M. OTTE**

הוכשרתי במדעי הביולוגיה והגיאולוגיה באוניברסיטת היידלברג בגרמניה ובאוניברסיטת פרייבורג בגרמניה, עם התמחות בביולוגיה מולקולרית, ביוכימיה ומיקרוביולוגיה. בשנת 2018, השלמתי את הדוקטורט שלי באוניברסיטת טובינגן בגרמניה עם התמחות בגיאומיקרוביולוגיה ואקולוגיה מיקרובית, תוך מיקוד בחיידקים ממחזרי-ברזל במשקעים ימיים. מאז 2018, השתתפתי בקבוצת HGF-MPG לאקולוגיה ולטכנולוגיה של עומק הים במכון אלפרד ווגנר, מרכז הלמהולץ לחקר הקוטב והים בברמרהייבן, ובמכון מקס פלנק לאקולוגיה ימית בברמן, גרמניה. כיום אני עובדת על ההשפעות של כרייה בעומק הים באוקיינוס הפסיפי על מיקרואורגניזמים ממחזרי-מתכת בקרקעית הים, בעומק של 4,000 מטרים מתחת לפני הים. *julia.otte@awi.de

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



הוצאת פרונטירז מדע לצעירים ישראל
Hebrew version provided by



THE SAGOL NETWORK