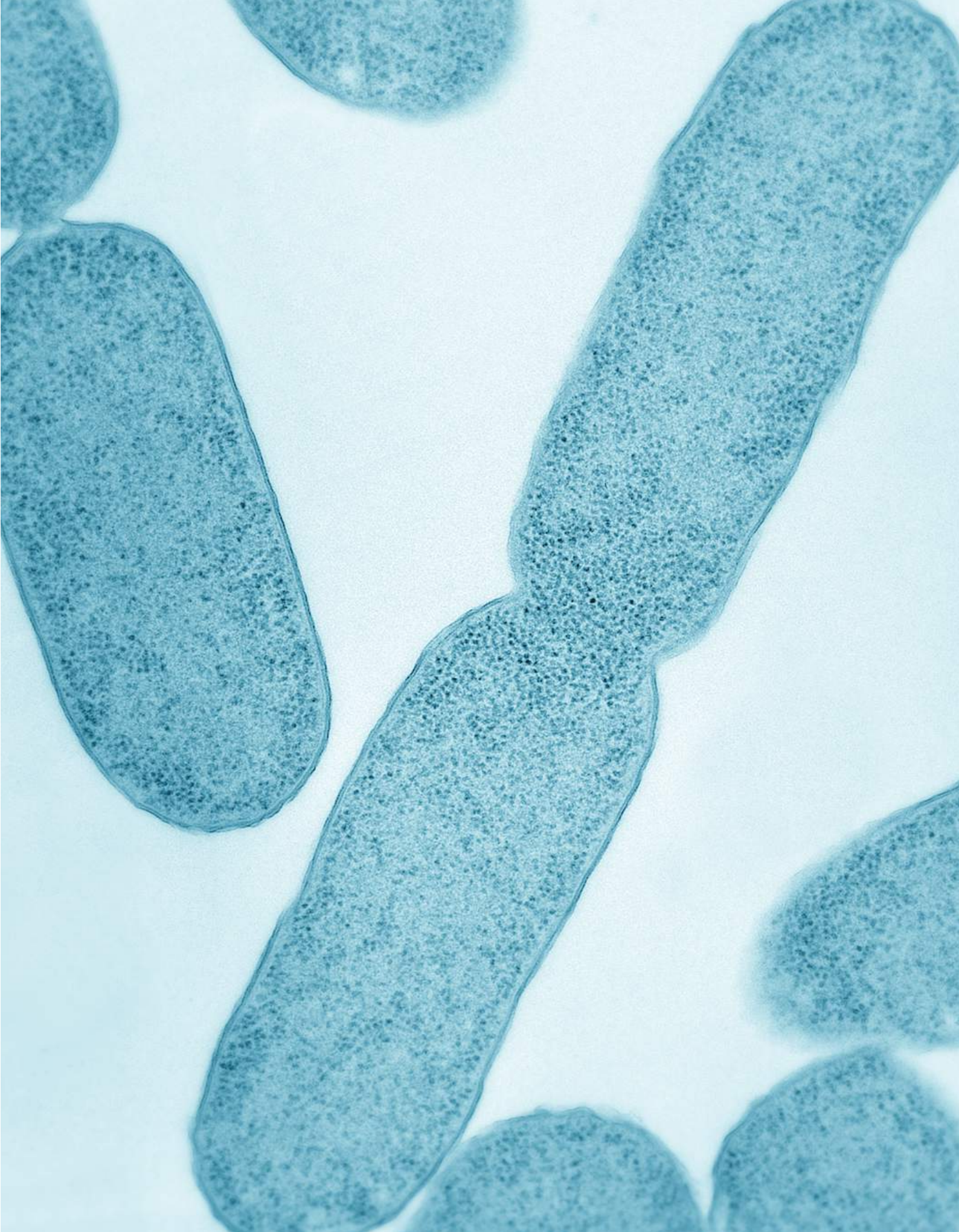


אבולוציה כאן ועכשיו

חקר האבולוציה מתקשר בעיני רבים עם מסעו של צ'ארלס דרווין, ועם דוגמאות רבות מספור של בעלי חיים ומאובנים אשר נאספו כדי לחזק את התאוריה שהציע. פרופ' צחי פלפל הוא חוקר אבולוציה, והמחקר שהוא מבצע במעבדה שונה במהותו ממחקרו של דרווין. בראש ובראשונה, הוא מיישם שיטות מולקולריות וחישוביות המאפשרות לבצע ניסויים בתהליכי אבולוציה. לדבריו, אבולוציה מתרחשת ממש לנגד עינינו, ולא רק במעבדה.



דיוקן

פרופ' צחי פלפל

פרופ' צחי פלפל חוקר תהליכי אבולוציה במחלקה לגנטיקה מולקולרית במכון ויצמן למדע. את התואר ראשון בביולוגיה למד באוניברסיטת תל אביב; בהמשך לימודיו רצה מאוד לשלב מתמטיקה עם לימודי הביולוגיה, ולגמרי במקרה הגיע למעבדה של פרופ' אפרים קציר ושל פרופ' דורון לנצט במכון ויצמן למדע. שם למד לתואר שלישי אשר עסק ביכולת לנבא את אופן הקישור בין חלבונים על פי תכונות כימיות, פיזיקליות ומבניות. את שלב הפוסט דוקטורט ביצע פלפל באוניברסיטת הרווארד בארצות הברית, במעבדתו של פרופ' ג'ורג' צ'רץ', וזאת בחקר הגנום. שם שינה כיוון מחלבונים וביופיזיקה לגנום ולרשתות של גנים. ב-2003 הקים את המעבדה במכון ויצמן למדע.

מראיינת: גילת בריל

איך אתם חוקרים תהליכי אבולוציה במעבדה?

דרווין חקר תהליכי אבולוציה בנסיעה ברחבי העולם, תוך כדי התבוננות בטבע וניסיון להבין ממנו מה התרחש בעבר. אנחנו לא דרווין, וגם נמצאים ברחובות ולא מטיילים בעולם. מכיוון שג'ירפות או קופים הם אורגניזמים גדולים מדי למעבדה, אנחנו עושים אבולוציה לאורגניזמים חד-תאיים: בעיקר חיידקים ושמרים, אבל גם לתאים סרטניים בתרבית.

למה הכוונה בביטוי "לעשות אבולוציה" לחיידקים?

השיטה שבה מדובר מתוארת במאמר שהמלצתי עליו, אבולוציה ניסויית של לנסקי, ממציא השיטה: מגדלים מיליון חיידקים במיליליטר אחד של מצע גידול. תנאי הגידול טובים, כך שיש לחיידקים מזון בשפע, והם מתחלקים בערך פעם בשעה. לאחר שבעה מחזורי חלוקה משאבי המזון נעשים מוגבלים יותר, והחיידקים עוברים לשלב הקבוע. בסוף היום יש במבחנה 128 (2^7) מיליון חיידקים. בזמן התרבות החיידקים במבחנה חלים אפוא 108 מאורעות של חלוקת תא. למחרת בבוקר לוקחים דגימה בנפח של אחד חלקי 128 מהחיידקים שבמבחנה זו ומכניסים אותם למבחנה חדשה ובה מצע גידול חדש. את המבחנה הישנה עם החיידקים שנותרו - מקפיאים. לחיידקים שגדלו מהר יותר מהאחרים יש סיכוי גדול יותר להידגם ולעבור למבחנה החדשה מאשר לחיידקים שגדלו לאט. בכך לנסקי מבצע תהליך של ברירה טבעית. הוא אינו מעמיד אותם בפני שום אתגר: הם גדלים בקרקע מזון עשירה, בטמפרטורה נעימה. אבל מי שמתרבה בקצב מהיר יותר יש לו סיכוי גבוה יותר להידגם.

מה התגלה בעזרת שיטה זו?

לנסקי החל לעקוב אחר שינויים בתכונות שקל לבדוק אותן, כלל לא ברמה המולקולרית. הוא החל בבדיקת ההבדל בקצב הגידול של החיידקים, שהוא כושר ההתאמה שלהם (fitness). לדוגמה, יכול להיות שאחרי חודש נמצא שהחיידקים מתחלקים פעם בחמישים וחמש דקות במקום פעם בשעה. לאחר מכן חקר לנסקי מוטציות מסוימות, והיום הוא מסתכל על גנום שלם. כך הוא גילה עקרונות שמתארים את סדר הופעת המוטציות עם הזמן: הוא גילה שהאבולוציה מתקדמת מהר מאוד בתחילה ואחר כך מגיעה לכאורה להתייצבות. אבל אם הוא עוקב אחר האבולוציה 30 שנה, אפשר לראות שהיא מוסיפה לעלות. קצת כמו פרקטל, כשבכל סקאלה הוא נראה זהה.

אין שום ספק שהאבולוציה מתרחשת בתוך הגוף שלנו, בעודנו מדברים כרגע

מה אתם בודקים בשיטה זו?

הרחבנו את השיטה לכיוונים אחרים, שבהם אנחנו מאתגרים את האורגניזמים שבמבחנה. כיוון אחד הוא אקולוגי, ובו אנחנו משנים את תנאי הסביבה במבחנה: אנחנו דורשים מהחיידקים לגדול בטמפרטורה מאוד לא נוחה, או ב-pH שונה, או עם איזושהי תרופה כמו אנטיביוטיקה. בכל שלב אנחנו בודקים מהם השינויים הגנטיים שנוצרו בגנום של החיידקים הגדלים במב חנה.

כיוון שני הוא גנטי. אנחנו חוקרים תכונה מעניינת הנקראת כושר התפתחות (evolvability): היכולת לעבור אבולוציה. כדי להסביר למה הכוונה אני אוהב לתת לדוגמה את האייפון 5s, הכולל הרבה פונקציות. אבל הוא לא יודע להיות אייפון 6. הוא לא יכול לעבור אבולוציה. אילו יכולנו לשתול שבב באייפון 5 שיגרום לו להתפתח לאייפון 6, ממה היה צריך להיות מורכב השבב הזה? ביצורים חיים אנחנו מנסים למצוא "שבב כזה", כלומר, גנים המשפיעים על כושר ההתפתחות של חיידקים, ולבדוק איך הם משנים את הגנום שבו הם נמצאים. אלה גנים שאם נכניס אותם לחיידקים, החיידקים יעברו אבולוציה מהר יותר, או יפתרו אתגרים קשים בהצלחה מרובה יותר או מהר יותר מזן הבר. אחת מהיכולות שאנחנו מנסים להשתיל בחיידקים היא יכולת אבולוציה למארקיסטית, וימים יגידו אם נצליח.

כיוון שלישי הוא חקר סרטן. תאים סרטניים נבררים לפי היכולת שלהם לגדול מהר יותר מתאים אחרים ברקמה. לכן גידול סרטני הוא סימולציה חיה וכואבת של תהליך אבולוציוני. אנחנו מכירים את רצפי הגנום של אלפי סרטנים שונים, ומנסים להבין אילו תהליכים מולקולריים גנטיים התרחשו בגנום של התא הסרטני,

איך אפשר לחשב עלות ותועלת של גן

ברמה המולקולרית, גן מסוים המקודד לאנזים בחיידק מביא תועלת כלשהי, אבל הוא כרוך גם בעלויות ייצור. נניח שבדיקה במעבדה של קצב הגידול של החיידקים הראתה כי חיידק שיש לו את הגן מתחלק כל חצי שעה ואילו החיידק החסר את הגן מתחלק פעם בארבעים דקות. ההפרש בין עלות הגן לבין התועלת שלו יקבל יחידת מידה פשוטה, שהיא עשר דקות זמן חלוקה. אבל איך מודדים לחוד עלות או תועלת הטמונות בייצור גן, ולא רק את ההפרש ביניהן? אפשר ליצור מוטציה נקודתית בגן הפוגעת באזור הפעיל של האנזים, ולכן גורמת לכך שלא תהיה לו תועלת. במצב כזה, קצב הגידול של התא ירד באופן יחסי לעלות בלבד[1] ויתקבל זמן חלוקה אחר, לדוגמה 50 דקות או 35 דקות. זמן החלוקה שיתקבל בחיידקים עם המוטציה יהיה מספר המשקף מצב של עלות ללא תועלת. במצב כזה אפשר לשאול כיצד סלקציה פועלת על תכונה שאינה מועילה. כלומר, על תכונה שהתועלת שלה היא אפס, והסלקציה פועלת רק על העלות. וזה רק מקרה פרטי. המקרה הכללי יותר הוא שיש תועלת אבל העלות גדולה ממנה ולכן התכונה תאבד.

ואם בתא סרטני יכול להיווצר כושר התפתחות שאין לגנום של תאים אחרים.

אילו תחומים חדשים קיימים בחקר אבולוציה?

תחום אחד הוא אפיגנטיקה, שקיבלה תנופה גדולה מאוד בעשור האחרון. זהו מכלול תכונות שיש לאורגניזם שיכולות להיות מורשות לפחות דור אחד ולפעמים הרבה יותר מזה, אבל אינן מקודדות ברצף ה-DNA. לרוב אפיגנטיקה מזוהה עם שתי תופעות: האחת היא שינוי כימי המתרחש על בסיסי ה-DNA. השינוי המפורסם שבהם הוא מתילציה של ציטוזין, שגילו פרופ' חיים סידר ופרופ' אהרון רזין מהאוניברסיטה העברית בירושלים. המתילציה לא משנה את רצף ה-DNA אלא גורמת לכך שציטוזין

אנחנו עושים תהליך של ברירה טבעית לאורגניזמים חד-תאיים: מי שמתרבה בקצב מהיר יותר יש לו סיכוי גבוה יותר להידגם

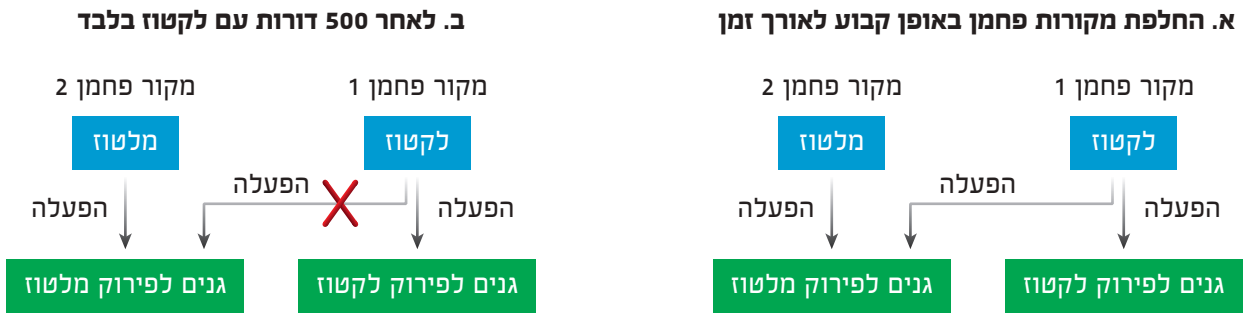
עם מתילציה מתנהג אחרת בבקרת תעתוק. חלק מהשינויים האלה יכולים לעבור לדור הבא. אז אם עשינו פעילות מסוימת, לדוגמה, אכלנו משהו, או התעמלנו או קראנו ספר או קיבלנו חיסון נגד שפעת, ייתכן שזה ישפיע על המתילציה של ציטוזין מסוים בגן מסוים בגנום שלנו. אם השינוי יתרחש בתאי הרבייה, יש סיכוי שהוא יועבר לדור הבא. כתוצאה מכך, הצאצא יתנהג כאילו גם הוא חווה את הקריאה או אכל את המאכל הזה.

תופעה שנייה המזוהה עם אפיגנטיקה היא שינויים שחלים מעט רחוק מה-DNA. לדוגמה, שינויים בהיסטונים אך גם שינויים ברמת ה-RNA וגם ברמת החלבון. בניגוד ל-DNA, שהיא מולקולה פחות פעילה כימית, RNA היא מולקולה פעילה מאוד. מולקולת RNA יכולה להשתכפל בתנאים מסוימים, כלומר מולקולת RNA יכולה ליצור מולקולת RNA נוספת גם בלי תבנית של ה-DNA, ולעבור לדורות הבאים. זהו למעשה מידע אפיגנטי, שכן הוא לעולם לא נצרב ב-DNA. גם ברמת החלבון יכול להיות שכפול עצמי כזה. יש חלבונים הנקראים פריונים, למשל אלה המחוללים את מחלת הפרה המשוגעת, שיכולים לשכפל את עצמם.

לפי שתי תופעות אלה, אפיגנטיקה היא היכולת להעביר לדורות הבאים מידע שנצבר בפרט מסוים ללא רצף של DNA. אפשר לראות באפיגנטיקה למארקיזם עם מנגנונים מולקולריים. בעיניי זאת מהפכה בחקר האבולוציה.

תחום חדש אחר בחקר אבולוציה נפתח בזכות שיטת ריצוף של DNA הנקראת מטה-ג'נומיקס. את רוב החיידקים בטבע אי אפשר לגדל במעבדה. הסיבה היא שלרוב, האקולוגיה שלהם מורכבת מאוד, או מפני שתנאי הגידול שהם צריכים אינם ידועים. מטה-ג'נומיקס עוקפת את שלב הגידול במעבדה.

[1] ההנחה היא שייצור הגן בתא נשאר בדיוק כפי שהיה לפני המוטציה, אף על פי שייתכן מצב של משוב, שבו התא מייצר יותר אנזימים מהגן, משום שהאנזימים הנוצרים אינם פעילים ולכן ריכוז הסובסטראט נותר גבוה. במקרים רבים הייצור אכן ממשיך באותו קצב, ולכן עלויות הייצור של הגן תישארנה כפי שהיו לפני המוטציה.



איור 1: למידה אבולוציונית באוכלוסיית חיידקים א. בזן הבר של E.coli מופעלים הגנים לפירוק מלטוז כבר בשלב של נוכחות לקטוז. כאשר בסביבת הגדול מופיע מלטוז, החיידקים כבר "מוכנים" לנצלו ב. כאשר גדלים החיידקים דורות רבים ללא החלפת מקור הפחמן למלטוז, מפסיקים החיידקים להפעיל את הגנים לפירוק מלטוז בשלב הגידול בנוכחות לקטוז.

מפיקים בבת אחת DNA מכל החיידקים במיליליטר של מי ים, או מדגימה מהאדמה או מאיבר מסוים בגוף, ומרצפים את ה-DNA שלהם יחד. ריצוף רגיל דומה להרכבת פאזל מקופסה אחת, משום שבמעבדה מגדלים חיידק מזן יחיד. מטה-גינומיקס דומה להרכבת פאזלים מתוך שק המכיל פאזלים רבים מאוד שלא הצלחנו לשים בקופסאות. יכול להיות שנצליח להרכיב שמש מפאזל אחד ופיראט מפאזל אחר, או רק קטעים של פאזלים; אולי נצליח להרכיב חלק מהפאזלים עד הסוף. זהו אתגר גדול מאוד שמשתתפים בו גם מדענים מתחום מדעי המחשב. אבל גם בעזרת המידע החלקי המתקבל אפשר לשאול שאלות חדשות: אפשר לבדוק מהו הרכב ה-DNA של המיקרואורגניזמים במעי של עכבר ששינו לו את המזון, לפני ואחרי השינוי; או בדם לפני ואחרי אנטיביוטיקה, או במהלך ההתבגרות שלו או במהלך

אפיגנטיקה היא היכולת להעביר לדורות הבאים מידע שנצבר בפרט מסוים ללא רצף של DNA, ואפשר לראות בה למארקיזם עם מנגנונים מולקולאריים

מחלה ויראלית. אפילו אם לא הצלחנו לשים את רצפי ה-DNA שמקבלים בתוך הקופסאות של הפאזלים, עדיין אפשר לפענח את האבולוציה של אוכלוסיות מעורבות של חיידקים.

אחד המאמרים בגיליון הנוכחי של "שמורת טבע" מביא ממצאים שלפיהם ביולוגים, כולל דרווין עצמו, מתקשים להסביר אובדן של תכונות במרוצת האבולוציה, כמו היעדר עיניים בחפרפרת. מהו ההסבר שלך לתהליך אבולוציוני של אובדן תכונה?

נתחיל בדוגמה של תכונה: שרירי הזרוע מביאים לנו תועלת מפני שאנחנו מרימים בעזרתם דברים, מפעילים מכשירים וכדומה. אבל עם זאת, תחזוקה של שריר דורשת השקעה ולכן יש לה עלות. כלומר, לכל תכונה ביולוגית יש תועלת ועלות. כדי שהתכונה תישמר, לא מספיק שתהיה בה רק תועלת, אלא צריך שהתועלת תהיה גדולה מהעלות. לכן אפשר להבין באילו מקרים יכולה הברירה הטבעית להוביל להיעלמות של תכונה: אם יש לתכונה עלות ואין לה תועלת, או אפילו אם יש לה תועלת אבל גם עלות שגדולה ממנה - במקרים כאלה התכונה נעלמת במרוצת האבולוציה.

בהקשר זה אביא דוגמה מאוד יפה לאובדן תכונה מהניסויים שלנו במעבדה. רצינו לבדוק אם אוכלוסייה של חיידקים יכולה ללמוד לאורך זמן על השינויים שחלים באופן קבוע בסביבת הגידול שלה, "לנבא" אותם ולהתכונן לקראתם מבעוד מועד. התמקדנו בחיידקי *E. coli* אשר גדלים במערכת העיכול של חיות ומופרשים לאדמה. ידוע כי בתחילת דרכם במערכת העיכול, חיידקי *E. coli* עוברים בסביבת גידול שבה לקטוז הוא מקור הפחמן, ובהמשך הדרך הם עוברים לסביבה שבה מלטוז הוא מקור הפחמן (איור 1). כדי לנצל כל אחד מהסוכרים הללו מופעלת בחיידקים סדרת גנים אחרת. מצאנו שבעוד שגידול החיידקים על מלטוז מפעיל את תעתוק הגנים הקשורים לניצול סוכר זה, גידול החיידקים על לקטוז מפעיל את הגנים הקשורים לניצול לקטוז (כצפוי) אך גם את הגנים הקשורים לניצול מלטוז (אם כי ברמה פחותה). מכאן הסקנו שחיידקי *E. coli* עברו אבולוציה במהלך ההיסטוריה שלהם בטבע להפעיל את הגנים לפירוק מלטוז כבר כאשר קיים לקטוז בסביבה, ועוד לפני שיש בה מלטוז (איור 1א), בהתאם לדרכם הקבועה במערכת העיכול.

בשלב הבא רצינו לבדוק אם הפעלת הגנים לניצול מלטוז על ידי לקטוז (החץ הצולב באיור 1א) נתונה לברירה טבעית. לשם כך גידלנו את אוכלוסיית החיידקים רק על לקטוז לאורך מאות דורות (איור 1ב). מצאנו שבמהרה החיידקים איבדו את היכולת לקשר בין לקטוז למלטוז. הסיבה היא שלביטוי של סדרת הגנים לניצול מלטוז יש עלות. בטבע מקור הפחמן משתנה מלקטוז למלטוז במורד מערכת העיכול. גם אם בכל הזמן של נוכחות לקטוז עד להופעת מלטוז החיידקים מבטאים את הגנים לניצול

יכול להיות שאחרי חודש נמצא שהחיידקים מתחלקים פעם בחמישים וחמש דקות במקום פעם בשעה

מלטוז לחינם, עדיין יש להם תועלת גדולה מהעלות, משום שמלטוז תמיד הופיע. לעומת זאת, בניסוי האבולוציה שערכנו, מקור הפחמן אינו משתנה למלטוז, ואז הגנים לניצול מלטוז התבטאו לחינם, והחיידקים שילמו עלות ללא תועלת. לכן עם הזמן תכונה זו נעלמה.

מחשבות על המרק הקדום

אחד מהרעיונות הנוגעים לראשית החיים הוא שבמרק הקדום הופיע מתישהו חומר, אולי RNA, שידע ליצור את עצמו מחומר מוצא פשוט יותר. כשחקרתי במעבדה של פרופ' אפרים קציר ופרופ' דורון לנצט אינטראקציות בין חלבונים, פיתחנו מודל מתמטי שונה של התופעה: במקום חומר שידע ליצור את עצמו הצענו רשת של חומרים שיכולה ליצור את עצמה: חומר 1 יוצר את חומר 2, חומר 2 יוצר את חומר 3, 3 את 4 וכולי, והחומר האחרון ברשת יוצר את חומר 1. תיתכנה גם רשתות שכל אחד מחבריהן מקושר לחלק מהאחרים, ממש כמו ברשתות החברתיות השונות. אם הרשת מספיק מקושרת, היא יכולה ליצור את עצמה למרות שאף לא אחד מהחומרים המרכיבים אותה יכול ליצור את עצמו. בבסיס המשוואות הדיפרנציאליות המתארות את התהליכים האלה הייתה פונקציית ההסתברות של אינטראקציה בין מולקולות. קישור אקראי, שתכונותיו נקבעות על ידי סטטיסטיקה בלבד, הוא רעיון חריג בביולוגיה: לרוב, קישור בין מולקולות הוא מדויק, שכן הוא תוצר של אבולוציה. למשל, אינסולין נקשר ספציפית לקולטן שלו ולא לאחרים. קישור אקראי הוא למעשה הדרך שבה אנו קולטים ריח: אין לנו קולטן לכל ריח בעולם, אלא חומרי הריח נקשרים למאות סוגים של קולטנים בתאי האף. הקישור של חומר ריח מסוים לכל סוג של קולטן ריח הוא מעט שונה, וכך לכל חומר ריח יש דגם שונה של קישור על פני תאי האף המועבר למוח. כלומר, אנחנו קולטים ריח באמצעות פונקציה הסתברותית. במעבדה למדנו את המאפיינים של הפונקציה ההסתברותית הזאת, והשתמשנו בה פעם כדי להבין איך נעשה קידוד של ריח, ופעם שנייה כדי לשחק במחשבות על תחילת החיים, עם מנגנון של רשתות של חומרים בעלי תכונות קטליטיות.

בניסוי גידלנו את החיידקים במשך 500 דורות ללא מלטוז, ובסופם מצאנו שהם איבדו את הקישור הצולב בין לקטוז לגנים לניצול מלטוז. אבל עדיין יכולנו לשאול אם הם איבדו גם את הגנים לניצול מלטוז ואם גנים אלה איבדו את היכולת להגיב למלטוז עצמו. הסתבר שלא. ההסבר הוא שמדובר בשני תנאים שונים לגמרי של תהליכי אבולוציה: בהיעדר מלטוז, הקישור הצולב בין לקטוז לגנים למלטוז אבד עם הזמן, משום שהייתה לו עלות ולא הייתה לו תועלת. לכן חל נגדו תהליך מהיר יחסית של ברירה[2]: בהיעדר מלטוז, לחיידקים שהפסיקו להפעיל את הגנים לניצול מלטוז בנוכחות לקטוז היה יתרון עצום באוכלוסייה, ולכן אובדן התכונה הזאת התקבע במהירות. לעומת זאת, בהיעדר מלטוז בתרבית, המסלול שבו מלטוז מפעיל גנים לניצול מלטוז אינו פעיל. לכן אין לו עלות ואין לו תועלת. הוא ניטרלי. אם הגנים לניצול מלטוז קיימים או לא, כשר ההתאמה (fitness) אינו משתנה.

אנחנו חוקרים תכונה מעניינת הנקראת כושר התפתחות: היכולת לעבור אבולוציה

אין עלות כי אין אף פעם מלטוז. אין תועלת כי מלטוז אינו מופיע. כתוצאה מכך, המסלול של מלטוז נתון לסחף גנטי, לתהליכים גנטיים אקראיים. תהליכי אבולוציה כתוצאה מסחף גנטי הם אטיים ביותר ולכן לא יכולנו לראות אותם לאחר 500 דורות.

מדוע איבדה החפרפרת את העיניים? אפשרות אחת היא שבחיים מתחת לאדמה יש לעין עלות אבל אין לה תועלת, בדומה להצלבה בין לקטוז לגנים למלטוז בניסוי עם החיידקים. אפשרות אחרת היא שלעיניים אין עלות ואין תועלת - בדומה למסלול של מלטוז בהיעדר מלטוז - ובתהליכים אטיים ביותר הן אבדו בגלל אירוע אקראי. אני יכול לדמיין שיש עלות לעיניים מתחת לאדמה, ולכן אני חושב שהאפשרות הראשונה מתאימה יותר.

איזה מסר היית רוצה להעביר למורים לביולוגיה ולמדעי הסביבה?

ברור לי שהאבולוציה היא תפישה קשה לעיכול. גם אני, שאני כל כך מושקע בתחום, עדיין עומד נדהם מול הטבע והמורכבות שלו. מה שמקסים במנגנון האבולוציוני הוא שבדרך פשוטה הוא מסביר משהו מורכב מאוד. לכן האינטואיציה שלנו מעלה קושי: איך כל המורכבות הזאת יכולה להיווצר בתהליך כל כך פשוט. אני מודה שיש כאן קושי הכרתי, תפישתי, אינטואיטיבי, ואיני רוצה לטאטא אותו מתחת לשטיח.

עם זאת, חשוב להבין שלאבולוציה יש בסיס ניסויי, שמתחיל להיות מוצק כמו הבסיס הניסויי של אימונולוגיה, פיזיולוגיה ובוטניקה. אבולוציה היא עובדה ניסיונית. עם כל הקושי לקבלה כתרחיש המתאר את העבר, היא מקבלת תוקף ניסויי מעבר לכך. גם אם מישהו לא מקבל את האבולוציה כתרחיש שמסביר את העבר שלנו, אין שום ספק שהאבולוציה מתרחשת ממש מול עינינו, ואין שום ספק שהאבולוציה מתרחשת בתוך הגוף שלנו, בעודנו מדברים כרגע, באופן שמשפיע על הבריאות שלנו.

לדוגמה, לאחר נטילת אנטיביוטיקה חלק מהחיידקים עלולים לפתח עמידות גנטית בפני האנטיביוטיקה, ובסבב הבא הם יהיו עמידים בפני טיפול כזה. זו אחת הבעיות הקשות ביותר ברפואה

מה זכור לך מלימודי הביולוגיה בתיכון?

למדתי במגמת ביולוגיה. הייתי תלמיד נורא מעצבן כי לא למדתי. בביוטופ של הקבוצה שלנו חקרנו חיידק מסוג בצילוס, שהוא טפיל שחי בתוך רימות של זבובים ומפריש רעלן שתוקף אותן. בבחינה שלי בעל פה על הביוטופ די הצלחתי. כשהסתיימה המורה שלי יצאה אחריי החוצה ואמרה לי: "יש לך יותר מזל משכל" וסגרה אחריה את הדלת...

[2] ברירה מסוג כזה נקראת ברירה מטהרת (purifying selection).

המודרנית. ברור שהחיידקים האלה עוברים אבולוציה ממש מול עינינו. זאת מציאות שללא הבנתה אין יכולת להתמודד עם מחלות זיהומיות. דוגמה אחרת היא סרטן. התאים מתרבים בעזרת מוטציות שחלות בהם ומעבירים אותן לדורות התאיים הבאים. ושוב, האבולוציה מתרחשת אל מול עינינו.

המערכת החיסונית היא דוגמה נוספת לעולם זעיר שבו מתרחש התהליך האבולוציוני: כאשר המערכת החיסונית נתקלת בפולש חדש לגוף שהיא לא נתקלה בו בעבר, תא ה-B המבטא את הנוגדן המתאים ביותר כנגד הפולש החדש מקבל אות ליצור מוטציה באזור ב-DNA שמקודד לנוגדנים. כלומר, התא הזה מייצר שונות גנטית באופן פעיל. כמו כן, התא מתרבה ונוצרת ממנו אוכלוסיית תאי B שמייצרת נוגדן שנראה כאילו תוכנן כל החיים בשביל הווירוס הזה. זאת אומרת שבמשך 3-4 ימים הושלם תהליך אבולוציוני מלא, שכל הרכיבים של אבולוציה דרוויניסטית נמצאים בו: יש שונות, יש הורשה גנטית של התוצרים המוצלחים, יש סלקציה ויש מוטציה. אפשר לרצף את ה-DNA של תאי המערכת החיסונית ופשוט לראות את האבולוציה מתרחשת. התרחיש האימונולוגי הכי בסיסי שקורה לנו מרגע שאנחנו נדבקים בגורם מחלה עד שאנחנו מתגברים על המחלה הוא בבואה של תהליך אבולוציוני מהסוג שדרווין תיאר ככזה המתרחש על פני מיליוני שנים.