

הביצה או התרנגולת - הקץ למיתוס קובי בן-ברק¹

מי קדם למי? הביצה או התרנגולת? השאלה הנצחית. שאלה זו תמיד מוצגת כדוגמה למצב בו אין אפשרות להפריד בין סיבה למסובב, בין גורם לתוצאה. ובכן, גברותי ורבותי, צר לנו. כדאי להתאמץ ולבחור שאלה אחרת, כיוון שלשאלה זו יש תשובה, ואפילו תשובה פשוטה - **הביצה**. הביצה הופיעה לפני התרנגולת. מדוע? על כך בהסבר הבא:

נתאר לעצמנו עולם קדום (לפני 42 מיליון שנה, למשל), ובו מין² לו נקרא "קדם-תרנגולת" (pre-hen). אל תנסו לחפש אותו. הוא כבר נכחד לפני מיליוני שנים.



הקדם-תרנגולות היו עופות שקטים, שלווים ומסתפקים במועט. כל שחפצו היה מעט גרגרים לאכול ולהקים דורות חדשים. אמנם שלוותם של בני המין הופרעה מדי פעם על-ידי מוטציות, מהן נוצרו עופרים פגומים, גוזלים שאינם יכולים לשרוד, ושאר פגעים שמוטציות שליליות יכולות לגרום, אלא שהעופות הבינו שתופעה זו היא חלק מהחיים, ואינה מכוונת אישית נגדם דווקא. "מוטציות הפוגעות בהישרדות

מתרחשות בכל מין", כך ניחמו את עצמם בני המין, "אך כיוון שהמוטציות מתרחשות בתדירות מאד נמוכה ובאקראי, אין בהן בכדי לאיים על הישרדותנו".

השינוי הגורלי

אלא שיום אחד (או שמא היה זה לילה?), באקראי, אירעה באחד מתאי הזוויג של נקבה אחת (או שמא היה זה זכר? לעולם לא נדע) שינוי מקרי ב-DNA של אחד הגנים האחראיים על עובי המקור, למשל. השינוי ב-DNA גרם ליצירת חלבון בעל מבנה שונה, ובעל פעילות משופרת. השינויים שחלו בחלבון זה הביאו להתפתחות מקור עבה וחזק יותר.

לא הייתה זו הפעם הראשונה שמוטציה התרחשה בגן זה. במהלך הדורות הקודמים חלו שינויים רבים בגן (כמו בכל גן). אלא שכל השינויים בגן ובחלבון הנוצר ממנו עד אותו יום גורלי לא הביאו לשיפור בתכונות המקור אלא פגמו בו, וגרמו לו להיות חלש ופריך. הפעם, לעומת זאת, נוצר חלבון בעל פעילות אנזימטית מהירה יותר והמקור הפך חזק ועבה יותר. כעת,

¹ ד"ר קובי בן-ברק, המרכז הישראלי למצוינות בחינוך, התיכון הישראלי למדעים ולאמנויות
kobybb@012.net.il

² רצה הגורל, או אולי אליעזר בן-יהודה, והמילה העברית "מין" מתארת גם sex וגם מין ביולוגי – species. כנהוג במדע, אנו נשתמש במילה "מין" במובנה הביולוגי (species). "מין" במובן sex יכולה כאן זוויג.

בעזרת המקור החזק, יכולה הייתה הגוזלה לפצח גרגרים קשים יותר, להעשיר את הדיאטה שלה, ולהגביר את סיכויי הישרדותה.

אמנם בני הלהקה הבחינו במקור העבה והחזק של הגוזלה החביבה רק לאחר בקיעתה מן הביצה, אך הבינו מיד שהשינוי כבר היה קיים בביצה. אחד הגנים המקודדים את תהליכי התפתחות המקור, עבר מוטציה עוד בשלב היווצרות תאי הביצית (או הזרע) בגופה של אמה (או אביה) של הגוזלה, והתבטא לראשונה בביצה המופרית, בעת יצירת העובר. הם ידעו ששינוי גנטי בתאי הזוויג אינו מתבטא בהזדווגה בו חל השינוי, ולכן העובר המתפתח בביצה ולאחר הבקיעה היה שונה גנטית ופיזית (גנוטיפית ופנוטיפית) מהוריו. זאת יכלו לראות כולם (יש לזכור שאין אפשרות לראות שינויים גנוטיפיים, אלא רק פנוטיפיים).

אלא שכאן לא מסתיים סיפורנו. הגוזלה, כדרכם של גוזלים, התפתחה והפכה לבוגרת, וכדרך של בוגרות, הקימה דור של צאצאים עם זכרי הקדם-תרנגולות שחזרו אחריה ללא הרף (ייתכן שהמקור העבה והחזק בו התגאתה, ששיפר מאד את תזונתה ואת גזרתה החטובה, הפך אותה למושכת ומקור לחיזוריהם הנמרצים של הזכרים). הצאצאים של אותה בוגרת, שירשו מאמם את הגן המבורך, היו אף הם בעלי מקור עבה וחזק. התוצאה הייתה צפויה וברורה - אחוז גבוה מצאצאי הבוגרת שרדו והקימו צאצאים משלהם, וכך הלאה בדורות הבאים. מכיוון שהישרדותם של בעלי-המקור העבה הייתה גבוהה מזו של בעלי המקור הרגיל, לא פלא הוא, איפה, שכעבור מספר אלפי שנים בלבד, התפשט הגן בכל האוכלוסייה וכל בני ובנות הלהקה היו בעלי מקור עבה וחזק.

האם בכך הסתיימה מסכת השינויים במין? לא ולא, וכי מדוע שתסתיים? כל גן בגנום הקדם-תרנגולות, כמו בכל מין אחר, עובר שינויים אקראיים. רובם המכריע של השינויים פוגם בהישרדות בעליו, אך אחת לאלף, לערך, מתרחש שינוי חיובי ("חיובי" מוגדר כשינוי המגביר את סיכויי ההישרדות של הפרט הנושא אותו בסביבה בה הוא נמצא).



חשוב להדגיש: השינוי הגנטי (מוטציה) המתרחש בגן כלשהו הוא אקראי, ואין לו ערך חיובי או שלילי. את הערך הניתן למוטציה אנו מעניקים בדיעבד, רק על פי השפעתה על הישרדות המין. בסביבה הספציפית בה הוא חי, השפעה המתבטאת אצל הצאצא בעל השינוי. ייתכן שגן מסוים השולט כעת באוכלוסייה יהיה

בעתיד בעל ערך הישרדותי נמוך אם וכאשר ישתנו התנאים. לדוגמה: אם רוב הגרעינים למאכל בשטח מצויים בתוך קוצים, למקור ארוך וחד יהיה ערך הישרדותי חיובי, אך אם יביא שינוי אקלימי שינוי בצמחיה ורוב הגרגרים יהיו מצויים על הקרקע, מקור קצר ורחב יהיה יעיל יותר.

וכך אספו להם במהלך הדורות הרבים בני הקדם-תרנגולות מוטציות חיוביות שונות (המוטציות השליליות נכחדו, מטבע הדברים), ששיפרו לא רק את המקור, אלא גם את מערכת העיכול, יכולת הריצה, מערכות הורמונליות שונות, המראה החיצוני, ועוד.

המפגש הגורלי

והנה, יום אחד, לאחר מאות אלפי שנים, ולאחר שכל בני הלהקה עברו שינויים גנטיים רבים, הגיעה אל הלהקה במסגרת "חילופי עופות" משלחת של קדם-תרנגולות מהלהקה השכנה. להקה זו חיה כל השנים במנותק מעבר להרים הגבוהים. כשניסו בני ובנות שתי הלהקות השונות להקים במלוא ההתלהבות צאצאים זו עם זה, התברר לאכזבתם שהדבר אינו מתאפשר. למרות מאמציהם הכנים, לא התפתחו ביצים כלל מזיווגי בני שתי הלהקות. זיווגי בני הלהקות השונות הפך לבלתי אפשרי, כך התברר במהרה.

"לא קשה להבין מדוע", נאנחו זקני הלהקות. "מוטציות רבות, בשתי הלהקות, גרמו לשינויים בתאי הזוויג, בהרגלי החיזור, באברי הרבייה עצמם, ביכולת ההתבטאות של גנים של זרע זכר מלהקה א' בתוך ביצית של נקבה מלהקה ב', ועוד, ועוד".

ההפרדה הגיאוגרפית, שנמשכה מאות אלפי שנים, גרמה לכך שחלו שינויים בשתי הלהקות, שינויים נפרדים ואקראיים, ש"סחפו" את התכונות הגנטיות והפיסיות של בני שתי הלהקות לכיוונים שונים, עד מצב של חוסר יכולת הפרייה הדדית. נוצרו שני מינים נפרדים. בלשון מדעית יותר - נוצרו שני "מאגרי גנים" סגורים, שאינם יכולים עוד להתמזג זה עם זה.

"בזאת נפרדו דרכינו", סיכמו בעצב זקני הלהקות. "אין את מי להאשים, אלא את האדון דארווין. כל הלהקה היא מין נפרד, ללא יכולת החלפת גנים בינינו", נאנחו. וכך, במהלך הדורות הבאים, המשיך כל מין ואסף שינויים גנטיים (וכתוצאה מכך גם פיסיים) שהגדילו עוד יותר את ההבדלים ביניהם. אחד המינים הוא מין התרנגולת, המוכר לנו. והמין האחר? אין לדעת. יתכן שהוא נכחד, יתכן שהפך לאחד ממיני העופות האחרים המוכרים לנו כיום.

הרחבה: על המנגנונים הגורמים ליצירת מינים חדשים

קיימת נטייה לחשוב שמחסום הרבייה הוא חוסר ההתאמה בין הזרע של מין אחד לביצית של המין האחר. כאשר הזרע אינו יכול להתקשר אל רצפטורים על גבי קרום הביצית, הוא לא יחדור אליה ולא ייווצר עובר. אך אין זה המחסום היחיד היכול לגרום לחוסר הפרייה. אברי הרבייה עצמם יכולים להפוך לבלתי מתאימים, עלולה להיות אי-התאמה כרומוזומלית [סוס וחמור המולידיים צאצא בלתי-פורה (פֶּרְד)].

תופעה מאד מעניינת שאובחנה בציפורים היא חוסר התאמה התנהגותית, ולא פיסית, המוליכה ליצירת מינים חדשים על-ידי יצירת מחסום רבייה התנהגותי בין זכר ונקבה.

חוקרי עופות מפלורידה דיווחו על אוכלוסייה של דרורים, שחלקה נדד דרומה. לאחר דורות רבים השתנתה שירת הזכרים באוכלוסייה אחת. הם יצרו "דיאלקט" חדש של שירה. כשנפגשו זכרים ונקבות משתי האוכלוסיות כעבור דורות רבים, הם לא נמשכו זה לזו. לא הייתה קיימת מניעה פיסית להתרבות, אך נוצרה עקרות פסיכולוגית/התנהגותית.

סביר שלאורך דורות רבים, בהם תמנע החלפת גנים בין האוכלוסיות, יחול "סחף" גם במערך הגנטי והפיסיולוגי, ויווצרו שני מינים חדשים השונים זה מזה גם גנטית ופיסיולוגית. מהם ייווצרו מינים חדשים ברבות הדורות, וכך הלאה.

אז מי קדם למי?

נחזור אל השאלה שהצגנו בכותרת – מי קדם למי? הביצה או התרנגולת? ובכן, שימו לב היכן חלו השינויים הגנטיים שהובילו, במרוצת הדורות, לשינוי מין. הם חלו באחד מאלפי ומיליוני תאי הזוויג (זרעים או ביציות) של אחד העופות הבוגרים של מין הקדם-תרנגולת. תא זוויג זה יצר זיגוטה עם תא הזוויג האחר, וזו התפתחה לעובר בעל תכונות שונות מהוריו.

נדגיש שוב – השינויים האקראיים בגנום של תא הביצית או הזרע שיצרו את העובר ה"משופר" אינם משפיעים כלל על גופו של ההורה בו חל השינוי (הם אינם שינויים "סומטיים", בלשונם של הגנטיקאים). מאום לא השתנה בגנום של ההורים בעקבות יצירת העובר השונה. ההורים נותרו חברי כבוד במין הקדם-תרנגולות, אך העובר כבר שונה גנטית מהוריו! כשיבקע העובר מן הביצה, יבוא שינוי זה לידי ביטוי תפקודי (פנוטיפי), שישפיע (לטובה או לרעה) על סיכויי הישרדותו של הבוגר המתפתח בסביבה בה הוא חי.

אמת, נכון הדבר שהביצה המופרית גדלה בשלבים הראשונים בגוף האם ונהנית מחומה (עופות וזוחלים), או אף ניזונה ממנה לכל אורך ההריון (יונקים). אך גוף האם אינו אלא "אכסניה" עבור העובר המתפתח בביצה. העובר הוא "אורח" בגוף אמו, אין כל חילופי גנים ביניהם, ואין לראות בהם גוף אחד. היא נותרה שייכת למין הקודם. הוא בדרכו ליצור מין חדש.

גורלו של המין קדם-תרנגולת

יתכן שהאָשם הוא בסרטים ההוליוודיים, או בדמיון המפותח שלנו. בכל מקרה, אנו נוטים לתאר את הכחדות המינים באבולוציה כאירועים דרמטיים, המלווים בדם ואש ותמרות עשן של אסטרואידים מן החלל החיצון המתנפצים אל כדור הארץ ומשמידים 80% מן המינים החיים באותה תקופה על פניו (ואת כל הדינוזאורים 'האכזריים', כמובן).

שוב, לא נותר לנו אלא לאכזב אתכם. רוב המינים לא "נכחדים" במובנה הדרמטי של המילה, אלא פשוט נמוגים. ראו מה עלה בגורלו של מין הקדם-תרנגולת מיודענו - כיוון שמוטציות מסוימות יצרו פרטים בעלי כושר הישרדות גבוה (ולכן אנו מכנים אותן "חיוביות"), דחקו צאצאי אותם פרטים את רגלי בני המין בעלי המקור הרגיל ממקורות המחיה, עד להיעלמותם האיטית. תהליך הדרגתי כזה יכול להתרחש משך אלפי שנים. כך אמנם קרה גם לכל אותם מיני ביניים בינינו ובין האב הקדמון שיצר אותנו ואת השימפנזים.

סביר מאד גם שבני המין הקדם-תרנגולת לא השאירו כל מאובן אחריהם, או, אם להתבטא יותר בזהירות – מאובנים של בני מין אלה עדיין לא נמצאו. יש לזכור גם שרוב המאובנים שנמצאו שייכים למינים בעלי עצמות גְרָמִיות. מיני ביניים של רכיכות, חיידקים, רבי-תאים ועוד לא השאירו ולו מאובן אחד ולעולם לא נדע על קיומם. ישנה הערכה שמספר המינים שחיו אי-פעם בעולם גדול פי 20,000 (!) ממספר המינים החיים כיום, רובם פשוט דעכו ונעלמו באופן מאד לא הירואי.

ולסיום, קצת גנטיקה

תיארנו היווצרות של יתרון הישרדותי של מין חדש (התרנגולת) בהשוואה למין המוצא (קדום-תרנגולת) עקב רצף של שינויים שחלו במשך הרבה שנים בגנים האחראיים על עובי המקור. כל גן מתבטא באופן אקטיבי בתאי הגוף של האורגניזם, ויוצר מקור עבה וחזק. כל אחד מהגנים הללו הגיע מתא הביצית של האם, או מתא הזרע של האב, שבאחד מהם חלה המוטציה (הסיכוי ששינוי כזה יחול בשני תאי הזוויג באותו דור, וששני תאי זוויג אלה יפרו זו את זו הוא אפסי). הגן המקביל לו (אָלל, בלשון הגנטיקאים), נותר ללא שינוי, וממשיך לקודד את ייצור החלבון היעיל פחות (זה היוצר מקור רגיל). מקרה כמו זה הוא מקרה קלסי של אלל דומיננטי – מספיקה נוכחות של אלל אחד מבין השניים בכדי ליצור שינוי מלא בתאי העובר והבוגר המתפתחים מן הביצה המופרית.

מנגנון הפצתו של אלל דומיננטי עד ליצירת תכונה חדשה הוא קל להבנה, והוא תואר למעלה. השאלה הקשה יותר היא "איך יופצו אללים רצסיביים בעלי יתרון, ויצרו תכונה חדשה (ואחריה גם מין חדש)?" נביא דוגמה לשם המחשה: נאמר שמספר קטן של בני המין קדום-תרנגולת היגרו ממקום מושבם, בו האקלים קר יחסית, לסביבה חדשה, בה האקלים חם יותר. אלא שבנישה החמה החדשה מקשות עליהם הנוצות הרבות והעבות המכסות את גופם את הקיום, אותן נוצות שעזרו להם מאד בנישה הקרה הקודמת.

והנה יום אחד, חלה בתא הזרע של זכר מסוים מוטציה באחד האללים של הגן המקודד את ייצור אחד מבין האנזימים האחראיים ליצירת הנוצות העבות. אָלל זה (נקרא לו f), מייצר כעת אנזים בעל מבנה שונה שאינו יכול להשתתף בייצור הנוצות. אם יהיו בגנום האורגניזם שני אללים מוטציוניים (ff, העוף יהיה הומוזיגוט רצסיבי), יהיו כל האנזימים המיוצרים מאללים אלו פגומים והתוצאה היא שתיווצרנה נוצות קטנות יותר.

רצה המקרה, והזרע המכיל את האלל המוטציוני הוא זה שהפריה תא ביצית. כיצד תראינה נוצותיו של העוף הבוקע מן הביצה? התשובה: נוצותיו תהיינה עבות כשל כל אחיו, וזאת כיוון שהביצית סיפקה לעובר המתפתח אלל דומיננטי תקין (F). הצאצא מכיל בכל תא מתאי גופו את שני האללים – אלל (F) המייצר חלבון רגיל (ולכן נוצות רגילות), ואלל (f) המייצר חלבון "פגום". הגנוטיפ של הצאצא הוא Ff, והפנוטיפ – נוצות עבות, כאילו היה בעל גנוטיפ FF. כשיתבגר, יכילו תאי הזוויג של אותו זכר רק אלל אחד – F, או f. האלל f יופץ באוכלוסיה, אך לא יתבטא. הוא יופץ גם בזכרים וגם

בנקבות בדורות הבאים.



והנה, באחד הדורות הבאים, כשביצית המכילה f תופרה באקראי בזרע המכיל אף הוא אלל f, ייוצר בביצה עובר בעל גנוטיפ ff, ממנו יצמח בוגר בעל נוצות דקות, מה שיגביר את סיכוייו לשרוד בסביבה החמה ולהקים צאצאים. צאצאים אלו, בעלי גנוטיפ ff יפצו את האלל באוכלוסיה בנישה האקלימית החדשה והחמה. האלל הדומיננטי F

יעלם לאטו מהמאגר הגנטי של האוכלוסייה.

אנו רגילים לסבור שהמוטציות פוגמות בסיכויי ההישרדות של האורגניזמים. אך שימו לב שלמרות שהחלבון שנוצר על-ידי האלל f הוא "פגום" (יוצר אנזים בלתי מתפקד), הרי בסביבה נתונה דווקא חלבון פגום ייצור תכונה שתהייה בעלת יתרון לבעליה. הנוצות הנוצרות מהאללים f אמנם שונות מהרגיל, אך מעניקות לבעליהן יתרון. כיוון שכל מוטציה "נשפטת" בסביבה בה היא מתרחשת, מוטציה זו דווקא שינתה את מבנה הנוצות באופן ששיפר את יכולת ההישרדות של העוף הנושא אותה.

כך, באופן איטי מאוד, יופץ האלל הרצסיבי עד שכל הפרטים באוכלוסייה יהיו בעלי הגנוטיפ ff, ובעלי הפנוטיפ המועדף בנישה האקולוגית הנתונה – בעלי נוצות דקות. גם במקרה זה השינוי לגנוטיפ ff התרחש עם יצירת הזיגוטה, ויצר עובר (ואחר-כך בוגר), השונה מהוריו. כלומר: הגנוטיפ השונה היה כבר בביצה המופרית, לפני התבטאותו כפנוטיפ בתרנגולת. גם במקרה זה קדמה הביצה לתרנגולת.

סיכום

לשאלה "מי קדם למי?" יש תשובה - הביצה. עוף בוגר, השונה מהוריו, ובדרכו ליצירת מין חדש, היה כך כבר בביצה. ובהסתכלות הפוכה – הורי הבוגר היוצרים בן או בת מין חדש, יוצרים ביצה המכילה עובר שאינו דומה להם. הביצה היא זו המייסדת את המין החדש.

גם בראייה אבולוציונית קדמה הביצה לתרנגולת - הראשונים שהטילו (ועדיין מטילים) ביצים על פני היבשה היו הזוחלים. מוצא העופות מן הזוחלים, כך שגם במובן האבולוציוני, כאשר נוצרו התרנגולות הראשונות, הן נוצרו לעולם בו הוטלו כבר ביצים מזה מיליוני שנים על-ידי הזוחלים.

כפי שאמרנו בפתיחה - כדאי להתאמץ ולחפש דוגמה אחרת לשאלה ללא תשובה. לשאלה קלאסית זו יש תשובה פשוטה. אם שברנו מיתוס - אנו מצטערים. אך אם למדנו קצת גנטיקה ואבולוציה - אנו יוצאים נשכרים, ומקווים שכך גם הקוראים.