



שמאל דוחה וימין מקרבת סימטרייה ושימור צורה בעולם החיים (טיוטה)



למורי, ג'ו רוזן
בהוקרה

תקציר: סימטרייה, מושלמת או חלקית, שולטת בצורותיהם של כל האורגניזמים, בין אם בצורת הגוף כולו או בחלקים ממנו. סימטרייה זו היא רק דוגמה אחת של שימור צורה – שימור צדי – לצד שימור הצורה האינדיווידואלי (קביעות) והטקסונומי (אחידות). מהן הסיבות הביולוגיות לשימורים אלה? חוקי הפיזיקה מפגינים שימורי צורה שונים, המהווים אף הם סימטריות. ייתכן אם כן ששימור הצורה הביולוגי מבטא את ההסתגלות במהלך האבולוציה לחוקי-טבע יותר ויותר יסודיים, כלומר, תקפים על פני יותר מקומות וזמנים. **תודות:** לנועם אורדן וד"ר קובי בן-ברק על הערותיהם ותיקוניהם.

מבוא

כוח היצירה של עולם החיים מגיע לעתים לשיאים של יופי שהם מעבר לכוחו של אמן מן השורה לתארום. כך אני חש למראה אדוני היער האסיאתי, שרק משורר-צייר-מיסטיקאי משיעור קומתו של ויליאם בלייק (1757-1827) הצליח לבטא את מיוזג ההוד והאימה שנוצקו בו:

Tiger, tiger, burning bright
In the forests of the night,
What immortal hand or eye
Could frame thy fearful symmetry?

אני בטוח שדי בבית הראשון כדי לעשות לכם חשק ללכת ולחפש ברשת את השיר בשלמותו. ברצוני רק להסב את תשומת לבכם למילה שבסוף הבית: היא היחידה ביצירה זו שאינה מתחרזת, ובכך שוברת את הסימטרייה. אבל מה שובר את הסימטרייה? המילה "סימטרייה" עצמה! רק בבית הלפני-אחרון והכל-כך נשגב של השיר – חפשו ותראו – באה הסימטרייה על תיקונה בדרך מפליאה: אסימטרייה שנייה מופיעה, ושתי האסימטריות מתאזנות לסימטרייה חדשה ברמה הגבוהה יותר.

ומכיוון שאין למילה סימטרייה מקבילה בעברית, העדיפו רוב מתרגמי העבריים של השיר לעקוף אותה. בגליונו הראשון של כתב-העת הספרותי קצר-הימים אֵב, הביא דורי מנור¹ ששה תרגומים לשירו של בלייק², ומכולם נפקדת המילה הקובעת:

א. היו ניסיונות להסביר חריגה זו בכך שבאנגלית הקדומה בה דיבר בלייק נהגה המילה symmetry כך שההברה האחרונה נשמעת כמו try, אבל הדעה המקובלת היא שהמילה נהגה גם אז כמו בימינו, כך שחוסר-האיזון היה מכוון, מה שתומך בדעתי כי הוא השאירו בציפייה ל-thee החותם את השיר.

ב. תרגום שביעי עשה לאחרונה רונן סוניס בכתב-העת המקוון "החושם",
<http://www.hahotem.com/page.asp?menuid=82&pageid=603>

טיגריס, טיגריס! בְּרַק אִוְרוֹת בְּלִילִים שֶׁל יַעְרוֹת, מִה יָד נֶצַח תִּחְמָה אֶת שְׁלִמּוֹתֶיךָ הָאֵימָה?	טיגריס, טיגריס! אִוֵּר יֵהֵל בְּיַעְרוֹת חֲשֹׁכֶת-הַלֵּיל, אִיזוֹ עֵין, יָד טְמִיכָה אֶת נַעַם-אֵימַתְךָ יִצְרָה?	נִמְר, נִמְר, לִפִּיד בּוֹעֵר בְּיַעְרוֹת הַלֵּיל זֹהָר. אִיזוֹ יָד אֶלְמָנֶת חֵיל תִּאֲמָךְ יְכַלֵּה הַכֵּלִיל?
דורי מנור, 1993	אלי בר-יהלום, 1993	נמר, נמר, לפיד בוער בְּיַעְרוֹת הַלֵּיל זֹהָר. אִיזוֹ יָד אֶלְמָנֶת חֵיל תִּאֲמָךְ יְכַלֵּה הַכֵּלִיל?
יהושוע כוכב, 1971	אלי בר-יהלום, 1993	נמר, נמר, לפיד בוער בְּיַעְרוֹת הַלֵּיל זֹהָר. אִיזוֹ יָד אֶלְמָנֶת חֵיל תִּאֲמָךְ יְכַלֵּה הַכֵּלִיל?
הוי, נמר, לפיד אימָה, הבוער באֵש-חֲמָה! אִיזוֹ עֵין, אִיזוֹ יָד יִצְרוֹךְ, פֶּחַד-עַד?	נמר, נמר, עֵינֶיךָ-נֹוֹר בְּיַעַר-לֵיל, זֶה בּוֹ תִּגּוֹר אִי יָד-הָאֵל, אִיזוֹ עֵין-זֶה עֲצָכָה דְמוּתֶךָ-אֵימִים חֲזָה?	נמר, נמר, לפיד בוער בְּיַעְרוֹת הַלֵּיל זֹהָר. אִיזוֹ יָד אֶלְמָנֶת חֵיל תִּאֲמָךְ יְכַלֵּה הַכֵּלִיל?
חנניה רייכמן, 1964	ראובן גרוסמן, תש"כ	ש. שלום, 1952

רק לוטן, שתרגם ספר מדע המוקדש לסימטרייה,² היה חייב להתמודד עם האתגר ישירות:

טיגריס, טיגריס! אֲשֶׁךְ זֶרְחָה
בְּיַעַר לֵיל הַחֲשֵׁכָה.
לֹא יָד-אֶנּוּשׁ הִיא שְׁמִתָּהּ
סימטרייה נִזְרָאָה שְׁלֶךְ.

וכל המתרגמים – אולי בלי לשים לב לכך – גם תיקנו את החריגה של בלייק וחרזו גם את השורה האחרונה.

הסימטרייה, המהלכת קסם כזה על בלייק וגורמת כאב-ראש למתרגמיו, היא לא רק אחד ממאפייניו השכיחים של היופי אלא גם אחד מסימני ההיכר של החיים כולם. מה הסיבה לסימטרייה זו, וכן לסדירויות מבניות נוספות המתגלות בגוף כל צמח ובעל-חיים? החיפוש אחרי תשובות יוביל אותנו אל כמה שאלות מרכזיות בנוגע לחוקי הטבע והחיים.

1. הסימטרייה גוברת על כוחות צורניים אחרים

אפתח דווקא בצורות חיים עליהן איני יודע דבר. מרבית סרטי המדע הבדיוני המתארים פגישות עם יצורים מהחלל החיצון מגלים כושר דימיון ירוד מאוד: כמעט תמיד מופיעים בהם החיזורים כדמויי אנוש או דומים ליצורים אחרים החיים על כדור-הארץ. אפילו מספר האצבעות שעל ידיהם – שבהתפתחות החיים על כדור-הארץ התקבע באקראי לפני 375 מיליון שנה – זהה לזה שלנו. כל מי שיש לו מושג כלשהו באבולוציה מבין שתיאור כזה אינו מציאותי. לכן העדויות על אנשים קטנים ירוקים (כסופים, שחורים או במשבצות) אינן שוות את הטרחה שבבדיקתן. הסיכוי שאבולוציה המתפתחת באופן בלתי תלוי



במקום אחר ביקום תיצור צורת חיים הדומות אפילו באופן קלוש לאלה שלנו, קטן אפילו מהסיכוי ששני מוזיקאים שגדלו בתרבויות שונות לחלוטין יכתבו יצירה מוזיקלית דומה.³

אם כך, איך באמת ייראו יצורים מהחלל החיצון, אם אי-פעם נראה אותם? כאמור אין לי שום מושג על כך. אבל בדבר אחד אני בטוח: תהיה להם מידה גבוהה של סימטרייה. האם תהיה זו סימטרייה כדורית, מעגלית, או דו-צדדית? סימטרייה של כל גופם או שרק חלקים מסוימים ממנו יהיו סימטריים? עד כדי כך איני רוצה עדיין להסתכן בניחוש. אבל באופן כללי, בהסתמך על צורות החיים שאנחנו מכירים בכדור הארץ, הניבוי שתהיה להם סימטרייה כלשהי נראה לי בטוח.

חשיבות הסימטרייה נעשית בולטת בעיקר במקרים בהם פועל על האורגניזם גורם מבני אחר, השובר את הסימטרייה. הנה ארבע דוגמאות:



א. נפתח בנו, בני האדם. המבנה הפנימי של גופנו אינו סימטרי מסיבות הנדסיות: רוב האיברים, כמו למשל הלב והריאות, חייבים לעבוד במקביל, וסידורם זה לצד זה שובר את הסימטרייה. בנוסף, מערכות ארוכות כמו המעיים מחייבות דחיסה לשטח קטן יותר, ואף צורך זה מכתוב שבירת סימטרייה. והנה, למרות אסימטרייה הכרחית זו מבפנים (תמונה 1), השלד, השרירים והגוף החיצוני הם סימטריים כמעט לחלוטין.

ב. שנית, הביטו על הבבונג (קמומיל) בתמונה 2, הנפוץ מאוד בשדות הארץ וידוע כצמח מרפא עתיר תכונות פרמקולוגיות. הוא משתייך, לצד מיודעינו הסביון, החרצית והחמניה, למשפחת המורכבים (Compositae), שמיד תבינו את פשר שמה: מה שנראה לכם כפרח סימטרי אחד הוא תפרחת של הרבה פרחים שרבים מהם הם אסימטריים. כך, מה שנראה כעלה כותרת הוא בעצם פרח שלם בפני עצמו, הקרוי "פרח לשוני", והוא מאוד לא סימטרי: יש לו כמה עלי כותרת צהובים קטנטנים ועלה לבן אחד, ארוך מאוד. גם מה שנראה כאבקנים הם פרחים זעירים הקרויים "פרחים צינוריים", סימטריים, בעלי עלי כותרת קטנטנים צהובים. עכשיו, קחו הרבה פרחים צינוריים וצופו אותם בעיגול, ומסביבם הציבו במעגל פרחים לשוניים כך שעלה הכותרת הלבן הארוך של כל אחד מהם פונה החוצה, והרי לפניכם "פרח" הבבונג המרהיב.

³ כן, אני יודע, העין התפתחה לפחות שבע פעמים בבעלי-חיים שונים במהלך האבולוציה, ודארווין עצמו הודה שהדבר הטריד אותו מאוד. קיימת אבולוציה מתכנסת כתוצאה מאילוצי סביבה זהים, אבל כיוון שפעולתה של העין תלויה לא רק במבנה שלה אלא גם במנגנונים הכימיים של תגובה לאור, מנגנונים אלה ידועים כבעלי מקור גנטי משותף.

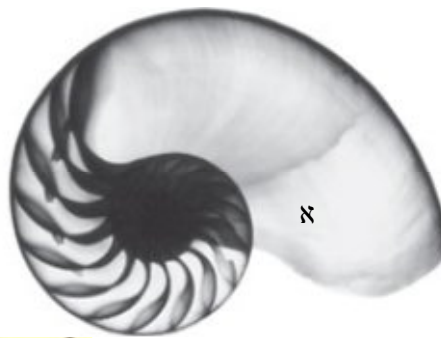


פרחים לשוניים

פרחים צינוריים

2

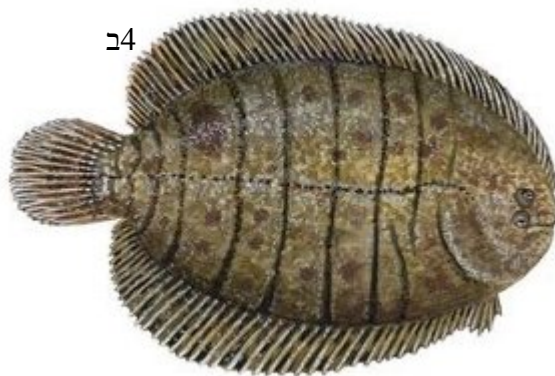
ג. קונכיית החילזון **אינה** יכולה להיות סימטרית כיוון שהיא צריכה למלא שלוש דרישות מנוגדות- לכאורה: להיות קשיחה, לסגור על הגוף מבחוץ, ולגדול אתו במהלך חייו. שלוש דרישות אלה, שדורות של מתמטיקאים יגעו למצוא את הנוסחה האידיאלית למילויין יחד, הובילו במהלך האבולוציה לפיתרון בצורת מבנה סלילוני (תמונה א3) השובר את הסימטריה ימין-שמאל (ב3). והנה יש חלזונות, כגון המגדלון, שקונכייתם התפתחה לצורת חרוט צר ומוארך, כך ששבירת הסימטריה הייתה צריכה להיות בולטת מאוד (ג3). אבל לא: במקרים אלה פונה הקונכייה לא אל הצד אלא **אחורנית** (ד3), ובכך היא יוצרת מחדש מבנה סימטרי.



3



ד. דג משה רבנו (תמונה 4א), המוכר לאוהבי מאכלי הים כדג Sole (אנגלית: סוליה), נראה כאילו מישוהו דרך עליו מלמעלה כדי לעשות ממנו שניצל פילה עוד לפני שעלה בחכה. למסורת העממית יש הסבר יותר מכובד לצורה פחוסה זו: כשחצה משה רבנו את ים סוף, עבר הדג המסכן במקום הלא-נכון ונחצה גם הוא לשניים. סיפור נחמד, אבל האמת הביולוגית עולה על כל דימיון: מה לדעתכם אתם רואים בתמונה? לכאורה, דג שטוח הרובץ על קרקעית הים, ששתי עיניו נמצאות על גבו ופיו ברובו בצד הבטן, נכון? אז זהו שלא: מה שאתם רואים זה דג הרובץ על **הצד**, שתי עיניו קבועות בצד **ימין** ופיו נוטה לצד **שמאל** (או להיפך, אל תתפסו אותי במילה כי זה משתנה ממין למין).¹ אינכם מאמינים? לכו ועקבו אחר התפתחותו מיום בקיעתו מהביצה. תראו תחילה דג קטן רגיל השוחה במים כמו שאר חבריו, ואז, במהלך כשמונה שבועות, נודדת אחת מעיניו אל הצד השני! במקביל הוא עובר בהדרגה לשחיית "צד" וכן נעשה לדג קרקעית. לכן, מה שנראה לכם בתמונה כזוג סנפירי **צד** שווים הם למעשה סנפיר **גב** שהתארך מאוד, וסנפיר **גחון** שהתארך גם הוא, עד שהם נראים כזוג מושלם. את עקבות התרמית תוכלו לראות אם תציצו בדג אחר מאותה משפחה (ציור 4ב): אפשר לראות שעמוד השדרה שלו סובל מעקמת ברורה, וזווית הפה, לא נעים, מתעקמת בגיחוך אוילי מימין לשתי העיניים.² בקיצור, מישוהו התעצל פה בגדול: הדג עבר הסבה לדג קרקע, אבל כיוון שכבר ממילא היה, כמו רוב הדגים, פחוס **מהצדדים**, למה לטרוח ולמעוך אותו מחדש מלמעלה כשאפשר פשוט להזיז את אחת מעיניו ואת פיו מצד לצד? עבודה מבריקה בהחלט, רק שהאבולוציה עוד לא גמרה לטשטש את עקבות החיפוף.



שתי מסקנות נובעות מדוגמאות אלה:

- ד. ברוב מיני הסוליתאים יש צד קבוע לעיניים, אבל למין החי בים אילת נבחר הצד באקראי, רמז לכך שמדובר במין קדום ששרד מהשלב שבו טרם התקבע הצד המועדף.
- ה. בחנויות דגי נוי תוכלו לראות סוג קטן יותר של הדג המדהים הזה (שלצערי לא הצלחתי לקיים בחיים לאורך זמן), וכשהוא נדבק לזכוכית האקווריום ניתן לראות ביתר בירור את עקבות האלתור האנאטומי.

גיאומטריה: יש צורות שבהן, אם נשברת סימטריה אחת, שבירת סימטריה נוספת תחזיר את הסימטריה הכוללת.

ביולוגיה: הסימטריה היא כורח החוזר ומתערב בעיצובם של יצורים חיים, ולכן נוקטת האבולוציה בכלל הגיאומטרי לעיל כדי לאזן כל אסימטריה באסימטריה אחרת.

ושוב, למה? מהי הסיבה שבגללה חוזרת האבולוציה וכופה מבנה סימטרי על יצורים שמלכתחילה אינם כאלה?

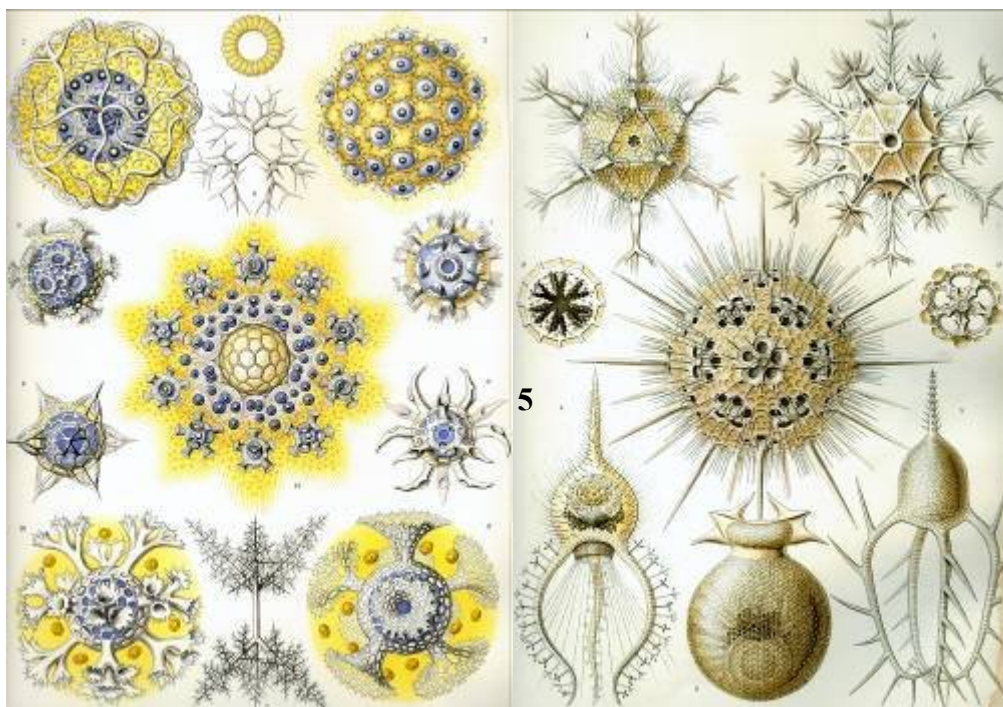
2. התופעה הכללית: שימור צורני בעולם החיים

ראשית, בואו נשים לב שסימטריה היא רק דוגמא אחת של שימור צורני (morphological invariance). מבחינה מתמטית, "סימטריה" פירושה שגם כאשר מסתכלים על צורה כלשהי מצד אחר, היא נותרת בעינה. זוהי דרגה גבוהה של שימור צורני במבנה האורגניזם החי, אבל קיימים שימורים פשוטים יותר. הבה, אם כן, נתוודע תחילה אל כל דרגות השימור ואחר כך נחקור את הסימטריה כמקרה פרטי.

באופן טבעי נפתח באחד היצורים החיים הפשוטים ביותר הידועים לנו, האמבה, *amoeba* (יוונית: אמויבה – להשתנות). אין בה שימור צורני ניכר לעין, פשוט מפני שאין לה צורה קבועה. איני מתכוון למבנה המיקרוסקופי של קרום האמבה, השומר על צורתו מבחינת השכבות שמהן הוא מורכב, ולאברונים העוד-יותר-מיקרוסקופיים שבתוך התא. צורת התא כולו אינה קבועה אלא משתנה מרגע לרגע. אבל אם נתבונן בשינויים אלה, נגלה שמהו חשוב משתמר בהם: אם יופיע פירור מזון מימין, תשלח האמבה ימינה זרוע מדומה (פסוידופודה) שהיא יוצרת באותו רגע. וכך הדבר לכל כיוון אחר. לאמבה, אם כן, יש שימור צורני חלש, שניתן להגדירו כך: צורת האורגניזם קבועה ביחס לאתגר שהסביבה מעמידה בפניו באותו רגע.

והנה, באותה ממלכה, הפרוטיסטה (חד-תאיים)¹, מופיעה מערכה אחרת המפגינה את הקיצוניות השנייה, לאמור, שימור צורני מקסימלי: חיידקים ממחלקת הקרנוניות, *radiolaria* (לטינית: רדיולוס – חיבור הגלגל, קרן שמש) והשמשיות, *heliozoa* (יוונית: הליוס – שמש, זואה – יצורים חיים) הם יצורים שצורתם א) קבועה, כלומר צורת היצור נותרת בעינה במשך חייו, ב) אחידה, כלומר שווה בכל הפרטים מאותו מין, ו-ג) קבועה מכל צד, כלומר בעלת סימטריה כדורית מושלמת. ציורי הרדיולאריה שאתם רואים באיור 5 הם מעשי ידי הזואולוג הגרמני ארנסט הקל, שהיה מדען מבריק אבל גם דמגוג לא קטן, ובציורים רבי-מכר אלה הוא עשה את המיקרובים שלו קצת יותר יפים מכפי שהם באמת (בעיקר, נראה לי, בקטע של הצבעים), אבל הם באמת מרהיבים.

1. חלוקת היצורים החיים לממלכות עוברת כיום שינויים ניכרים, בעיקר בנוגע למה שהורגלנו לקרוא "חיידקים", ואין טעם להתאמץ ולדייק בטקסונומיה שלהם עד שיגיעו המומחים להחלטה.



מהו השיקול האבולוציוני בבחירת צורה כזו? נזכור כי בדומה לאמבה, הרדיולאריון וההליוזואון הם יצורים קצרי-חיים. מבנה גופם חייב לתת מענה מהיר לאתגרי הסביבה בתקופה הקצרה שבה הם יכולים להתקיים. מבנה כדורי פירושו שכל סוגי האברים – פתחים לקליטת מזון, אברי חישה לקליטת מידה ושוטונים לתנועה במים – כולם מפוזרים במידה שווה בכל צדי גופו של החיידק. השיקול שביסוד מבנה כזה אומר: מכל צד מצדי גופי קיימת הסתברות שווה שהדבר הבא שאפגוש מכל צד יהיה אויב מרושע או פירור מזון טעים, סכנה או מקום מבטחים, ולכן אני מצויד בכל אבר בכל צד. במילים אחרות – וזה חשוב מאוד לשיקולים שינחו אותנו בהמשך – ההסתגלות היא לתנאים הממוצעים והמסתברים ביותר. ליצור כזה, אם כן, אין "למעלה" ו"למטה" (ממילא כוח הכבידה בגדלים אלה הוא חסר משמעות), ולא "ימין" ו"שמאל", "פנים" ו"אחור". הצורה בה הוא מופיע בפני סביבתו שווה מכל הצדדים. בקיצור: זה כדור. ראינו, אם כן, כבר בצורות חיים נמוכות, שלוש דרגות של שימור צורה מופיעות יחד, ונראה שאנו יכולים לצרף לכל אחת מהן את סיבתה הביולוגית:

א. שימור צורה אינדיווידואלי (קביעות): צורת האורגניזם קבועה לאורך חיי הפרט

הסיבה פשוטה: למבנה גמיש כמו זה של האמבה המשתנה ללא הרף יש מחיר בחזקת: הוא אינו יכול להיות מוצק דיו כדי להגן על החיידק. לכן, אם צריך לבחור מבנה מוצק, רצוי שמבנה זה יתאים לתנאים השוררים לא רק ברגע מסוים אלא בזמנים רבים ושונים. ושוב: האורגניזם מסתגל לתנאים הממוצעים ולא הרגעיים של סביבתו. לכן, צורה שהוכיחה את יעילותה בזמן מסוים תהיה בוודאי יעילה גם בזמנים אחרים.

ב. שימור צורה טקסונומי (אחידות): צורת האורגניזם קבועה בכל הפרטים של אותו מין

ברור למה: אם מבנה מסוים הוכח כעמיד בתנאים השוררים **בזמנים שונים**, ראוי גם שיהיה עמיד בפני התנאים השוררים **במקומות שונים**. כלל זה נכון בעיקר לגבי יצורים המסוגלים לנוע ממקום למקום. לכן צריכה צורה זו להיות נחלת כל הפרטים בני אותו מין.

ג. שימור צורה צדי (סימטריה): צורת האורגניזם קבועה מצדדים שונים של אותו פרט

שוב, קובע כאן השיקול ההסתברותי: ליצור פשוט וקצר-ימים הנסחף באקראי ממקום למקום, יש לכל אירוע, מועיל או מזיק, סיכויים שווים להתרחש מכל צד מצדדיו, ולכן הצורה שהוכחה כיעילה מצד אחד צריכה להיות יעילה גם מצדדים אחרים.

3. התזה: האינטואיטיות הביולוגיות נובעת מהאינטואיטיות של חוקי הפיזיקה

זה הזמן להביא את הטיעון המרכזי של מאמר זה, אותו אנסה לבסס בהמשך. שימורי הצורה הביולוגיים אינם יכולים שלא להזכיר לפיזיקאי סדרה אחרת של שימורים, הקשורה לחוקי בטבע היסודיים. **חוקי הפיזיקה, ככל שהם יסודיים יותר, הם גם יותר בלתי-משתנים.**

זכיתי בזמן לימודי הדוקטורט ואחד ממורי היה ג'ו רוזן, פיזיקאי עיוני ומומחה לסימטריה. ספרו "הסימטריה שולטת"³ הוא האחרון בסדרת ספרי-יסוד הממחישים את חשיבות הסימטריה בהתפתחות החשיבה הפיזיקלית.

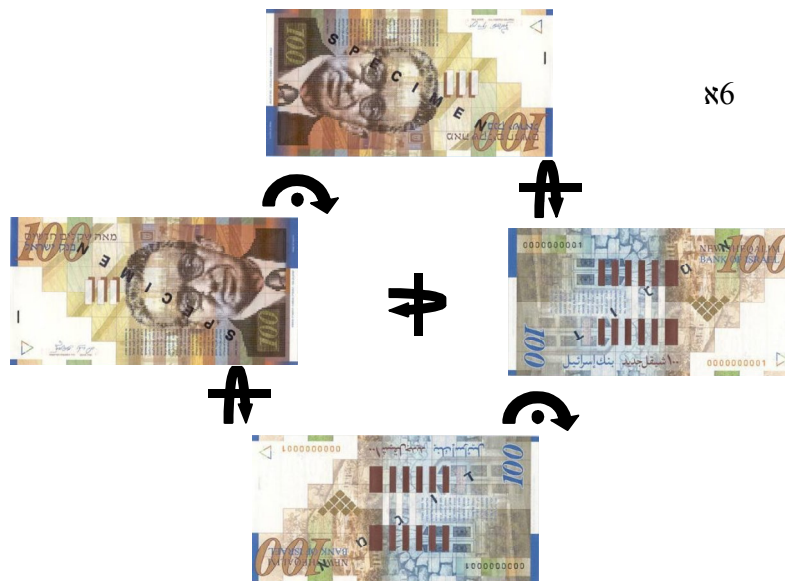
הנה דוגמא. יושב אדם אל שולחנו ומשחק במצפן, ואחרי הרבה ניסיונות הוא רושם חוק טבע חשוב: "מחט המצפן מצביעה תמיד שמאלה." בא חברו לבקרו והוא מראה לו את החוק שניסח, אבל החבר רואה שהמצפן מצביע דווקא ימינה, שהרי הוא מביט בו מעברו השני של השולחן! ואם יעמוד מהצד יצביע המצפן "קדימה", "אחורה" וכו'. יש כאן, אם כן, כמה חוקי טבע לגבי אותה תופעה, שכל אחד מהם מתאים לצופה אחר, וזו לא תוצאה מרשימה במיוחד. נעריך יותר את הישגם של שני הפיסיקאים הללו כאשר, אחרי הרבה חקירות ודרישות, יגיעו לניסוח חוק מאוחד כללי יותר: "מחט המצפן מצביעה תמיד צפונה." החוק הזה הוא יותר סימטרי, ולכן גם יותר אינטואיטיבי (בלתי משתנה) מקודמו, בכך שאינו תלוי במיקומו של הצופה ביחס לשולחן. אבל לא לעולם חוסן: כשיצאו שני המדענים הדגולים, מצוידים במצפנים, לסיבוב הרצאות בעולם להרצות על חידושם, ויגיעו במקרה לאולם הרצאות המצוי באי אלף רינגנס (Ellef Ringnes) צפונית לקנדה, יגלו שההדגמה נכשלת ושני מצפנים שם מצביעים – שוד ושבר – זה לכיוונו של זה! ואם יפליגו משם לנקודה הנגדית מול חוף אדלי (Adélie) שבאנטארקטיקה יגלו ששני המצפנים פונים לכיוונים הפוכים! נחוק, אם כן, חוק אינטואיטיבי עוד יותר, שלא יאבד את תוקפו אפילו בצפון או בדרום המגנטיים. לא יתעצלו השניים, יחפרו לעומק כדור הארץ ויגלו שהוא בעצם מגנט ענק המשפיע על כל המצפנים. החוק הבא שלהם יאמר, אם כן, כך: "מחט המצפן מצביעה לכיוון הקוטב המנוגד של השדה המגנטי בו היא נמצאת." וזה ללא ספק חוק עוד יותר כללי, שכוחו יפה גם על מאדים ואפילו על נוגה, למקרה שיתחשק לשניים לנסוע ולהרצות גם שם על התנהגות המצפנים.

הסימטרייה היא רק צורה אחת של הכלליות ואי-השינוי של חוק הטבע, מה שמכונה אינווריאנטיות. הנה עוד דוגמה של אינווריאנטיות: חוק טבע שנכון במקום אחד, נכון גם במקום אחר – אחרי הכל, זה יהיה די טיפשי אם נצטרך לקבוע חוק טבע אחד לשווייץ וחוק אחר לניו-זילנד. אם אותו ניסוי, כמו מדידת טמפרטורה, נותן תוצאות שונות בשני המקומות, נסיק שבשני המקומות שוררים **תנאים** שונים, אבל נחפש עד שנמצא **חוקים** זהים. הוא הדבר בנוגע לזמנים שונים. חוקי הפיזיקה, אם כן, מצטיינים ב"אינווריאנטיות תחת הזזה" ו"אינווריאנטיות תחת העתקה". אחת מחשובי המתמטיקאים והפיזיקאים במאה העשרים, אמי נתר (Noether), הוכיחה במשפט מפורסם כי לכל אחת מהסימטריות מקביל אחד מחוקי השימור של הפיזיקה. כך למשל:

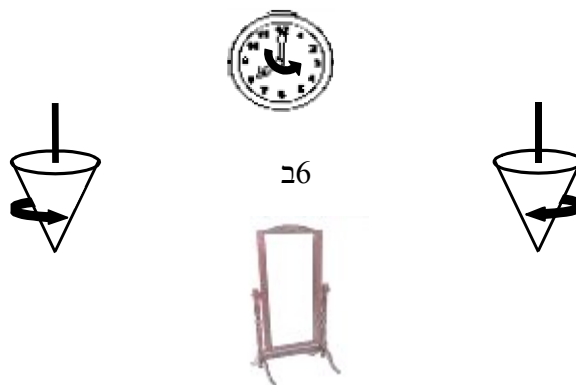
החוק	הסימטרייה
חוק שימור האנרגיה: האנרגיה בכל מערכת סגורה שווה בכל רגע נתון.	אינווריאנטיות בפני הזזה בזמן: החוק אינו משתנה מזמן לזמן
חוק שימור התנע: סך-כל התנעים במערכת נתונה נותר בעינו.	אינווריאנטיות בפני הזזה במרחב: החוק אינו משתנה אם נעתיק את ראשית הצירים ממקום למקום.
חוק שימור התנע הסיבובי: סך-כל התנעים הסיבוביים במערכת נתונה נותר בעינו.	אינווריאנטיות בפני סיבוב: החוק אינו משתנה אם נסובב את ראשית הצירים.

לסימטרייה יש דרגות. סימטרייה גבוהה היא זו המשאירה את הצורה בעינה תחת **כל** שינוי. כזו למשל היא הסימטרייה הכדורית: צורת הכדור נשארת בעינה אחרי כל סיבוב. הקוביה, לעומת זאת, סימטרית רק אחרי סיבובים של 90° מעלות, דף חלק הוא סימטרי רק אחרי סיבוב של 180° ואילו שטר-הכסף, המצוייר בצורה שונה משני צדדיו, סימטרי רק אחרי סיבוב של 360° . הסימטריות נעשות מורכבות יותר כשמדובר ביותר ממימד אחד. שטר הכסף אמנם אינו סימטרי אחרי סיבוב של 180° במימד אחד, אבל כן סימטרי אחרי שלושה סיבובים כאלה בשלושה מימדים (ציור 6א).

הדברים ייעשו מרתקים עוד יותר כשנביא בחשבון את המימד הרביעי, הזמן: כל תנועה יוצרת אסימטרייה הן במרחב והן בזמן, אבל הסימטרייה חוזרת תחת ההיפוך המשולב. הסביבון (ציור 6ב) הוא בעל סימטרייה רדיאלית כל עוד הוא עומד ללא ניע, ולכן שיקופו בראי, המחליף את צדדיו בשני ממדים, מותירו ללא שינוי. אבל כשהוא מסתובב נשברת סימטרייה זו והסיבוב שבראי הוא הפוך. כך גם בזמן: אם נצלם בוידאו סביבון עומד ונקרין את הסרט במהופך, לא יהיה הבדל בין הסרט לבין המקור, אבל אם הסביבון מסתובב, נשברת גם סימטרייה זו. עכשיו נעשה את **שני** ההיפוכים, כלומר שיקוף בראי ואחריו היפוך הסרט, או להיפך. מתקבל מחדש הסיבוב המקורי!



א6



ב6

הנה אם כן ההסבר שאני מציע לדרגות השונות של קביעות-הצורה בכל היצורים החיים:

כשם שחוקי הפיזיקה התפתחו לחוקים יותר ויותר אינווריאנטיים, כלומר, בעלי תוקף כללי החל על יותר ויותר מצבים, כך מסתגל גם האורגניזם אל אותם תנאים של סביבתו שהם יותר ויותר אינווריאנטיים, כלומר קיימים ביותר ויותר מקומות, זמנים וכיוונים.

נשוב אם כן אל הביולוגיה.

4. עליית המורכבות: שבירות סימטרייה מצטרפות לסימטריות גבוהות יותר

עכשיו, כשנמשיך לעקוב אחר התפתחות החיים לכיוון היצורים הרב-תאיים, נפגוש את הסיבה הראשונה לשבירת הסימטרייה, שהיא סיבה מבנית פשוטה: הגידול בנפח אינו מאפשר צורה כדורית כיוון שבכדור שטח הפנים הוא הקטן ביותר ביחס לנפח, מה שמקשה על אינטראקציות רבות עם הסביבה. יצור כזה יתקשה, למשל, לנשום, לספוג מזון או להפריש דרך הקרום העוטף אותו, וגם החימום והקרור יהפכו לבעיה. ועוד בעיה: היצור החד-תאי מצוייד בהמון "פיות" ובהמון "פיות-טבעת" מכל איבריו, וכולם

עובדים יחד בהמולה. גוף גדול מחייב איברים משוכללים יותר – לאמור, גדולים יותר – לאכילה ולהפרשה, ואותם כבר לא ניתן יהיה לפזר במידה שווה מכל הצדדים. לכן, מהרגע שהגוף עובר גודל מסוים, הופכת צורת הכדור מיתרון למעמסה.

מה נשאר? אליפטואידה, כלומר צורת מלפפון? גם היא לא תעזור הרבה, כי כאן מצטרפת עוד סיבה לשבירת הסימטרייה: אורגניזם מפותח אינו חייב להיסחף באופן פאסיבי עם זרמי המים והאוויר. להיפך: עדיף לתפוס מקום טוב איפה שהוא ולהישאר בו. כדאי גם לאמץ צורת עמידה קבועה, כי דברים שונים באים אלינו מלמעלה ומלמטה. לבסוף, רצוי לפתח גם צורת תנועה קבועה, ואז דברים שונים קורים לנו מלפנים ומאחור. כל אלה מאפשרים ומחייבים מבנה שבו יוצבו האיברים המתמחים במקומות העדיפים: אברי עמידה או תנועה בכיוון הקרקע, אברי החישה והפעולה העיקריים מלפנים, ואברי ההפרשה וההגנה הפאסיבית – מאחור.

מסענו במעלה הסולם האבולוציוני יוביל אותנו לשבירות הולכות ומתרבות של הסימטרייה. בכל זאת, כמו בשירו של בלייק, יאזנו האסימטריות אלה את אלה וכך ישיבו את הסימטריה למשול בהן.

החד-תא הנייד: סימטרייה מושלמת

כאן רק נחזור בקיצור על מה שנאמר על היצורים החד-תאיים בפרק 2: ליצור זעיר וקצר-חיים הנע ממקום למקום, שלא פיתח אפשרות להיאחז במקום מועדף כלשהו או להתייבב בעמדה כלשהי, יש סיכוי שווה לפגוש את אותם אירועים מכל אחד מצדדיו, ולכן הצורה שפיתח כדאי שתהיה שווה מכל הצדדים. מכאן הסימטרייה הכדורית המושלמת של היצורים המרהיבים בהם התחלנו.

בהמשך האבולוציה, כשהיה האורגניזם יותר ויותר אדון לגורלו מבחינת יציבתו ותנועותיו, יופיעו שבירות שונות בסימטרייה מושלמת זו, ולצדן, ברמה גבוהה יותר, סימטריות חדשות.

הפטרייה: שבירת הסימטרייה למעלה-למטה

תחנתנו הבאה היא הפטריות. תחילה, זכרו כי פטריות אינן צמחים כפי שחשבו בעבר. הביולוגיה משייכת אותן לממלכה נפרדת, בעיקר כי הפטרייה היא אורגניזם הֵטְרוֹטְרוֹפִי, לאמור, מפיק פחמן מתרכובות אורגניות שיצרו יצורים אחרים. זאת בניגוד לצמח, המייצר אותן בעצמו ע"י פוטוסינתזה, ולפיכך קרוי אוטוטרופי. לכך מתווספים הבדלים אנאטומיים ופיזיולוגיים נוספים. מפתיע, אבל מבחינה גנטית הפטרייה קרובה אלינו בעלי-החיים קצת יותר מאשר אל הצמחים.

נתעלם מהפטרייה המיקרוסקופית הידועה כ"שמרים" או מקרובותיה הנבזיות הנוטות לגדול על כפות רגלינו או, חלילה, במקומות יותר רגישים. ניקח את הפטרייה המוכרת, הרב-תאית, אותה אנו רואים בשדה או ביער, כמאכל תאוה או כרעל קטלני. שלושת דרגות שימור הצורה שראינו קודם בחד-תאיים קיימות בה, לאמור, הקביעות, האחידות והסימטרייה, אבל זו האחרונה נשברת חלקית: הסימטרייה של הפטרייה אינה כדורית אלא מעגלית. הצד בו נשברה הסימטרייה הוא האנכי: הקורים ("שורשים") פונים אל מתחת לקרקע, שם הם מוצאים מזון, והתפטיר ("הגבעול" וה"פרי") גדל כלפי מעלה, שם יפזר בבוא

היום את הנבגים מהכיפה החרוטית שבראשו כדי שיוכלו לעוף רחוק ככל האפשר. הסימטרייה נשברה, אם כן, לפי צורת היציבה המועדפת של הפטרייה. היא נשמרה, לעומת זאת, בכל הכיוונים האופקיים, שלגביהם אין לפטרייה שום העדפה.

למה? כאן חלים השיקולים לעיל. כל מי/מה שיבוא אל הפטרייה לעשות לה משהו טוב או רע, בין אם זה אור שמש מיטיב, חרק ידידותי או חיה רעבה, צפוי לבוא באותה הסתברות מכל הכיוונים. בהיעדר אברי חישה או פעולה, "בחרה" הפטרייה להיות בעלת חזות זהה מכל הצדדים (ובמרבית המקרים: עם אותה כמות רעל לכל אורח בלתי-קרוא מכל כיוון).

הצמח: שבירת אחידות הצורה

נעבור אל ממלכת הצמחים. כאן המצב מורכב יותר. כמו הפטרייה, גם הצמח קבוע במקום אחד: השורשים מחפשים מים למטה והעלים מחפשים אור שמש למעלה. אבל שלא כמו הפטרייה, לצמח יש עלים המצויידים בתאי פוטוסינתזה המסייעים לו לחוש מאיזה צד בא יותר אור, ולכן יכול הצמח לוותר על הסימטרייה המעגלית. זאת ועוד: הצמח בדרך-כלל מאריך חיים יותר מהפטרייה. מסיבות אלה יכול הצמח לוותר על עוד דרגה של שימור צורני, והיא אחידות הצורה: סביון אחד אינו דומה למשנהו בצורת גבעולו, במספר עליו ופרחיו וכדומה, פשוט מפני שהוא מסתגל לפיסת הקרקע הייחודית שעליה הוא חי את חייו. שימור אחד בכל זאת נשאר במבנה הצמח, והוא קביעות הצורה: אם נתעלם לרגע מתהליך גידולו של הצמח, הוא מגיע לבסוף לצורתה שהיא פחות או יותר קבועה (ובדרך-כלל, צורת הגבעול נשמרת עוד קודם לכן). הוויתור על אחידות הצורה פירושו שצורה זו היא אינדיבידואלית. הסיבה לכך ברורה: כשהצמח מבלה את כל חייו באותו מקום, הוא מסתגל לתנאים הקבועים של סביבתו זו. הנה לדוגמא צורת העץ, המתעצבת במשך שנים רבות. השיפוע הייחודי של הקרקע שעליה הוא גדל, כיוון קרינת השמש בשעות היום השונות, משטר הרוחות האופייני לאזור גידולו – כל התנאים המקומיים האלה מעצבים אותו בצורה האופטימלית למקום בו הוא מעביר את כל חייו.

והנה, כמו בפיזיקה, כך גם בביווגיה: שתי האסימטריות,

1. **מבנית:** אברי הפוטוסינתזה, האידוי והרבייה של הצמח נמצאים תמיד בצדו האחד ואילו אברי היניקה והאחיזה בקרקע בצדו הנגדי.

2. **מיקומית:** הצמח מפנה את שורשיו אל תוך האדמה ואת גזעו וענפיו החוצה, אל האוויר הפתוח.

מתאזנות יחד לסימטרייה ברמה גבוהה יותר:

3. **תפקודית:** השורשים פונים אל אותו צד ממנו באים המים בעוד העלים, הפרחים והפירות מופנים אל אותו צד ממנו באים האור, האוויר והמאביקים.

בעל החיים הרב-תאי: שבירת הסימטריות למעלה-למטה ולפנים-אחור

כשנעבור ממלכת הצמחים אל ממלכת בעלי-החיים, חוזר הזיגזג אל שימור צורה גבוה יותר: גם בעלי-החיים צורתם קבועה, אך בנוסף על כך היא גם אחידה: לכל הפרטים בני אותו מין יש בדרך כלל צורה

דומה. צורת הארנב, למשל, גם עומדת בעינה במהלך חייו (קביעות), וגם משותפת לו ולשאר אחיו הארנבים (אחידות). למה? פשוט: אחרי החד-תאיים, שנאלצו להסתגל לתנאים משתנים עקב **תנועה בעל-כרחם**, ואחרי הצמחים, שהמציאו את **ההיצמדות למקום עדיף**, המציאו בעלי-החיים את **התנועה הרצונית אל מקום עדיף**: למה להישאר כל החיים באותו מקום כשאפשר לעבור בכל רגע למקום מתאים יותר, למשל כדי לברוח מאויב חזק ממני שגילה אותי, או למרר את חייו של יצור חלש יותר שברח ממני? איך, אם כן, להסתגל לסביבה המשתנה מרגע לרגע? ראינו מה הייתה תשובת היצורים המיקרוסקופיים: הם בחרו בסימטרייה. מרבית היצורים המתנועעים צפויים להיחשף לאותם תנאי סביבה ולאותן תופעות בכל אזורי גופם. לכן, אם במענה לאתגרי הסביבה התפתח גופם בצורה מסוימת בצד אחד, סביר לצפות שתהיה לגופם אותה צורה גם הצדדים האחרים.

העניין נעשה מורכב יותר בהמשך האבולוציה. ההתמחות ההולכת וגוברת בצורת היציבה או בכיוון התנועה התבטאה בשבירה הולכת וגוברת של הסימטרייה. יצורים כמו מלפפון-הים שייכים למערכת קווצי-העור (echinodermata) השייכת לעל-המערכה דאטרסטומיה (Deuterostomia, "פה שני"): יש להם פתח אחד מלפנים לתזונה ופתח אחד מאחור להפרשה. מלפפון-הים מתקדם תוך בליעת החול שעל קרקעית הים, העובר דרך מעיו המפיקים ממנו את המזון ומפרישים אותו מאחור. פשוט וקל. ביצור זה שבירת הסימטרייה היא נמוכה: אליפסואידה במקום כדור. בעלי-חיים אחרים ממערכת קווצי העור הם קיפוד הים או כוכב הים. ליצורים אלו כבר יש כיוון יציבה מועדף – החלק של ה"פה" פונה אל קרקעית הים, ולכם הם אסימטריים גם בממד הגובה. לעומת זאת אין להם כיוון תנועה מועדף, וכשהם נעים בחיפוש אחר מזון או בבריחה מפני טורף אין להם צורך להסתובב ולהפנות את "פניהם" לכיוון תנועתם. גם כאן, היעדר התמחות מבנית, הקובעת את איברי התנועה והחישה בצדדים מיוחדים, יוצר סימטרייה מחומשת או עיגולית מושלמת. אם תזדמנו לאחד מחופי הים התיכון שבו יש כוכבי-ים וקיפודי ים, כמו קיסריה (אל תנסו את זה בים סוף כי שם קיפודי הים הם ארסיים) אתם מוזמנים לנסות את הניסוי הזה שכבר ניסיתי בעצמי. נסו לסובב כוכב ים או קיפוד ים סביב צירו, והוא לא יגיב כמעט. אך אם תהפכוהו על פיו הוא ישוב ויתהפך. אם כן, למרות השבירה של שימור הצורה המבנית בממד הגובה, נותר כאן שימור צורה דינמי: בעל-החיים מפנה תמיד את חלקו העליון לכיוון ההפוך לכיוון שדה הכבידה.



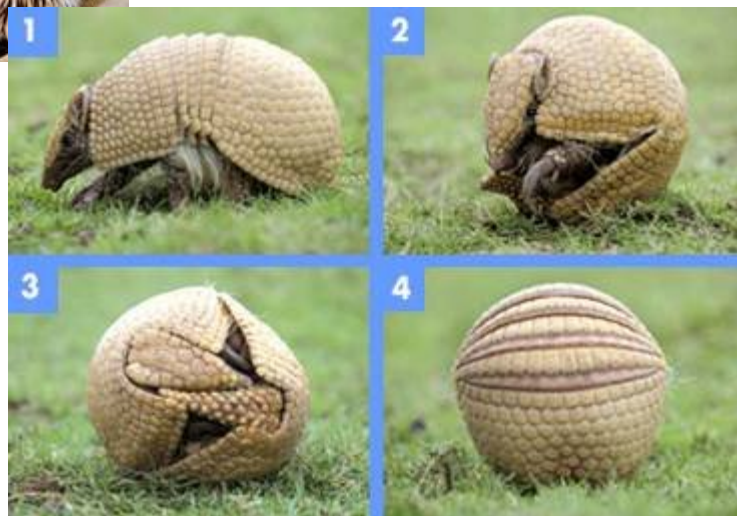
קיפוד-הים (ימין): היעדר כיוון תנועה מועדף יצר סימטרייה חצי-כדורית. הקיפוד מתגונן במידה שווה בכל הצדדים, מלבד בחלקו התחתון. הסימטרייה מעלה-מטה נשברה בשל הבחירה בכיוון יציבה מועדף כך שהפה פונה אל קרקעית הים.

המדוזה (שמאל): בחירה בכיוון יציבה מועדף וכיוון תנועה מועדף שברו עוד יותר את הסימטרייה, אך היעדר כיוון מועדף להתגוננות הותיר סימטרייה מעגלית.

הסימטרייה נשברת עוד יותר כשמתפתחת תנועה מהירה. המדוזה, אותה לטפנית חסרת-מעצורים המשוטטת סמוך לחופים ונטפלת למתרחצים תמימים, היא אסימטרית בבירור בין חלקה הקדמי לחלקה האחורי, וזאת משום שיש לה כיוון תנועה מועדף: הכיפה מלפנים והזרועות מאחור. לעומת זאת, אותה מדוזה אוהבת לבצע את מעשיה המגונים בכל זרועותיה, ולכן היא בעלת סימטרייה מעגלית במישור הניצב.

כשאנו מתקדמים עוד בסולם האבולוציוני, אל בעלי-חיים שחלקי גופם השונים פיתחו התמחויות תפקודיות, נשברת הסימטרייה עוד יותר. בעלי-חיים אלה ראויים יותר לשם בילאטריה (Bilateria, דו-צדדיים), הכולל, לצד קווצי-העור והרכיכות שדווקא אינם דו-צדדיים, את מרבית בעלי החיים, ובהם גם אנו. יצורים אלה הם אכן בעלי סימטרייה דו-צדדית בלבד, כלומר, נשברה הן הסימטרייה. הם התמחו לא רק בכיוון היציבה שלהם אלא גם בכיוון התנועה שלהם. לכן אברי התנועה והחישה שלהם ממוקמים בגופם בצורה היוצרת הבדל ברור בין פנים לאחור. לכאורה, התפתחות והתמחויות התפקודיות הללו הביאה לירידה בשימור הצורה של היצורים החיים, אבל גם כאן, כשנביא בחשבון את ממד הזמן בנוסף על ממדי המרחב, נגלה ששימור הצורה הכולל רק עלה. היצור שצורתו מבדילה בין "פנים" ו"אחור" הוא א-סימטרי מבחינה מבנית, אבל סימטרי לגמרי מבחינה דינמית. הוא מסגל לעצמו עמידה בכל זווית אפשרית בהתאם לאתגרי הסביבה. מבחינה זאת אנחנו וקיפוד-הים מגיבים על סכנות הסביבה באופנים חלופיים ובכל זאת בעלי אותו היגיון. שמענו לעיל את קיפוד-הים אומר: "לך תדע מהיכן יבואו עליי הצרות: מימין או משמאל, מלפנים או מאחור, מלמעלה או מלמטה. לכן אני לא הולך לשום מקום ואפילו לא מסתובב לשום כיוון אלא שולף קוצים חדים וארסיים לכל הכיוונים". ואילו אנחנו אומרים: "נכון, אין לדעת מהיכן יבואו הצרות, אבל מהיכן שלא יבואו, הן ימצאו אותנו באותו מצב: אנו נשנה את מיקומנו ותנוחתנו כך שאם יהיה לנו עסק עם משהו חלש מאתנו נהיה עם השיניים והציפורניים מופנות אליו (ומקרוב), או אם חלילה הוא חזק מאיתנו, הוא יראה את הגב שלנו (וממרחק רב ככל האפשר)". על אף שמדובר בשני אופני התנהגות שונים לחלוטין – עמידה בלא נוע לעומת סדרת תנועות מהירות – בשני המקרים בעל-החיים מפנה את אותה חזית כלפי הגורם החיצוני, מכל צד שהוא.

וכמה מעניין שהאסטרטגיה הראשונה חוזרת אצל בעלי-חיים מפותחים שהחליטו בשעת סכנה לחזור מאות מיליוני שנים אחרנית ולוותר על יכולת התנועה שלהם (איור 8). בואו נלך לפי הסדר. אין להתפלא על כך שקיפוד הים, שתנועתו איטית מאוד ללא כיוון תנועה מועדף, מאמץ צורה כדורית ומפנה את קוציו במידה שווה לכל עבר. הביטו עתה במרבה-הרגליים הכדורי, יצור יבשתי מפותח בעל כיוון יציבה מועדף וכיוון תנועה מועדף, ושתי שבירות סימטריה בהתאם. בשעת סכנה, כשהוא **מוותר על התנועה**, הוא **מוותר גם על שתי שבירות הסימטריה** וחוזר להיות כדור. את הוויתור הזה איצמו כמה בעלי-חיים מפותחים הרבה יותר כמו היונקים: כך עושה הקיפוד בגינה שלנו ברגע סכנה, כלומר, מאמץ צורה כדורית לצד הוויתור על יכולת התנועה שהשיגה ממלכת בעלי-החיים בדי-עמל במשך מאות מיליוני שנים! כמוהו עושה – במפגן הנדסי מרהיב – הארמדילו מדרום אמריקה.



ושוב, כמו בפיזיקה, כך נוהגת גם הביולוגיה במקרה שלפנינו: שתי האסימטריות,

1. **מבנית:** אברי החישה והפעולה העיקריים מוצבים בקדמת הגוף ואברי ההפרשה והאיזורים

הפחות פגיעים בירכתיו.

2. **התנהגותית:** בעל-החיים נע בכיוון קדמת הגוף.

מתאזנות יחד לסימטריה

3. **תפקודית:** כל דבר חשוב (מזון, בת/בן זוג, אויב חלש יותר) יהיה לפניי, וכל דבר מיותר (הפרשות, אויב חזק יותר) מאחריי.^ז

והנה מתגלה דבר מעניין: **התפתחות אחידות הצורה צועדת בד-בבד עם התפתחות הסימטרייה**. בכל מין שבו כל הפרטים הם בעלי אותה צורה, לאותה צורה קבועה יש גם סימטריה כזאת או אחרת. למה? כאן המקום לחזור ולהסביר את הנחות-היסוד במאמר זה.

שני מונחים חזרו על עצמם בהסברים האבולוציוניים לעיל לדרגות השונות של שימור צורני: "הסתגלות" ו"אינווריאנטיות". המונח הראשון מוכר היטב לביוLOGים, בעוד השני ידוע יותר מהמתמטיקה והפיזיקה, וההשערה שהצעתי בסוף פרק 3 מנסה ליישם אותו גם לאבולוציה. "אינווריאנטי" פירושו "עומד בעינו", וזה נכון גם ברמה הסטטיסטית: כשאנחנו עוברים בין מקומות שונים בזמנים שונים, משתנים הרבה דברים סביבנו, אבל יש דברים מעטים הנשארים בעינם, כמו למשל כיוון הכבידה המצביע תמיד למטה כל עוד לא התחשק לנו להתהפך פתאום על הראש. לכן, כשאורגניזם מסוים אינו סימטרי בכיוון כלשהו של גופו, יכולים אנו לנחש: זה גם הכיוון שבו יש לאורגניזם זה כיוון מועדף של יציבה או תנועה.



שרקק מצוי (Merops apiaster) "מתמתח"

צילם נדב קאסוטו, הוצג בתחרות צילומי הציפורים ע"ש עמית גפן ז"ל, 2008.

כך, כשם שהצורה האינדיווידואלית של האורן או השיטה בחורשה מלמדת אותנו על התנאים הממוצעים השוררים **באותה חלקה ספציפית, באותן שנים**, הרי צורת כנפי הציפור אומרת משהו על תכונותיו של האוויר **בכל מקום ובכל זמן**, צורת סנפירי הדג נובעת מתכונות המים **בכל מקום ובכל זמן**, וכך הלאה. בכל מבנה הידרודינמי או אווירודינמי מגולמת אותה הנחת יסוד: המצע שבו נע המבנה הזה הוא בעל

ז. טוב, עם בני/בנות זוג זה קצת יותר מורכב ברגעים מסויימים, אבל הכלל הוא אותו כלל.

תכונות אחידות. אם כן, אנו יכולים לסכם שימור צורה כזה באופן הבא: צורתו של בעל-החיים מבטאת הסתגלות לאותם מאפיינים של הסביבה שהם עצמם קבועים במקום ובזמן.

יש יוצא-מן-הכלל בין הצמחים המתקשר באופן מעניין לצורת בעלי-החיים. בוודאי הבחנתם שההכללה שעשיתי על האינדיווידואליות של צורות הצמחים אינה תמיד נכונה. יש עצים שהצורה שלהם דווקא אחידה, למשל עץ האשוח, דקל הווינגטוניה ועצים אחרים המתהדרים בצורה יפה בלי הבדלים אינדיווידואליים רבים. והנה, בכל העצים בעלי אחידות הצורה, הנטייה של הגזע היא תמיד אחת: **היישר כלפי מעלה**. העץ כולו בנוי כך שכל הענפים מסודרים מסביב לגזע המרכזי כך שהם יוצרים יחד צורה אופיינית שקדקודה פונה למעלה. אם כן, העצים שיש להם צורה אחידה מסתגלים לא לתנאים המקומיים אלא לאותו תנאי השורר **בכל המקומות** שבו נמצאים כל העצים האלה, דהיינו, **כיוון כוח המשיכה**.

---סטטולטים, חלקיקי אבן בתוך התא הצמחי מגלים את כיוון הגרוויטציה

והנה, גם כאן, כמו בבעלי-החיים, מתגלה אותו צימוד: **כל העצים בעלי אחידות הצורה הם גם בעלי סימטרייה**. הסימטרייה המעגלית הכמעט מושלמת של העצים הללו מאשרת את טענתי: צורתם מבטאת הסתגלות לא לתנאים המקומיים והזמניים אלא לתנאים השוררים בכל מקום ובכל זמן.

סיכום: ביטויי שימור הצורה בגוף האורגניזם

א. **שימור הצורה ביחס לנסיבות**: צורת האורגניזם משתנה, אבל היא קבועה ביחס לכל מצב בפני עצמו.

ב. **שימור הצורה בזמן**: צורת האורגניזם נותרת בעינה לאורך זמן.

ג. **שימור הצורה ביחס למקום**: האורגניזם שומר על צורתו בהתאם למקום בו הוא שוכן קבע.

ד. **שימור הצורה בין פרטים**: צורת האורגניזם זהה בין פרטים שונים מאותו מין.

ה. **שימור הצורה בין הצדדים**: צורת האורגניזם זהה מצדדים שונים.

הדמיון הזה בין חוקי הפיזיקה לחוקי האבולוציה בוודאי אינו מקרי. חוקרים רבים הבחינו בכך שהאבולוציה והתפתחות המדע הם תהליכים מקבילים של גידול ידע על העולם. אם האבולוציה היא תהליך של הסתגלות, הרי הסתגלות מצריכה מידע על הסביבה שאליה מסתגל האורגניזם. אפשר אפוא לראות את האבולוציה כמין צורה פרימיטיבית של למידה: מידע על הסביבה הולך ונצבר בתהליך של ניסוי וטעייה, בגנום של היצורים החיים, ועל סמך המידע הזה נעשית ההסתגלות. כשאני קונה שעון צלילה העמיד לתנאים שבמעמקי הים, אני מניח שהיפני שבנה אותו היה מצויד במידע מספיק על תנאי הלחץ, הטמפרטורה והאור במעמקי הים. עכשיו, צאו וחשבו כמה מידע מגולם במבנה של דג אחד! לכן, אם אנחנו עושים השוואה בין התפתחות המדע להתפתחות היצורים החיים, אנו יכולים להמשיך את

ההשוואה כך: כשם שהתפתחות המדע ניכרת בשימור הולך וגדל של חוקיו (שימור במרחב, בזמן ובכיוון), כך גם ההסתגלות האבולוציונית יוצרת במבנה גופם של האורגניזם שימור צורה הולך וגדל (קביעות, אחדות וסימטריה). כשם שהמדע חותר אל האחדות שביסוד הריבוי, אל הגדלים הנותרים בעינם למרות כל השינויים סביבנו, כך גם האבולוציה גורמת לאורגניזמים להסתגל אל אותם מאפיינים של הסביבה שהם היציבים ביותר במקום ובזמן.

5. סימטריה ואסימטריה בחלקים בודדים של האורגניזם

---פרחים הם בדרך-כלל סימטריים. סקירה מקיפה ומרתקת בנושא זה פורסמה ע"י אמוץ דפני וחב⁴



איריסים. הפרח הוא אסימטרי במישור מעלה-מטה כדי לאפשר לדבורה, שגם אצלה נשברה סימטריה זו, להיכנס לתוכו בתנוחה שתאפשר האבקה מיטבית.

הכלל : כשחלק מאורגניזם אינו סימטרי, הוא מוצב בכיוון קבוע ביחס לאתגר הסביבתי אתו הוא מתמודד

הכלל : כשחלק מאורגניזם סימטרי אינו סימטרי, הוא נמצא מחוץ למישור הסימטריה של הגוף כולו

הטבלה הבאה תסכם עבורנו את ביטויי שימור הצורה בגוף האורגניזם.

ההסתגלות	התקיימות בזמן ובמקום	סוג השימור הצורני	האורגניזם	
			תת-יחידה	
הסתגלות רגעית ספציפית לתנאים רגועים במקום ספציפי	קצרת חיים נסחפת באקראי	אין שימור חיצוני בצורה הכוללת	אמבה	
הסתגלות כללית לתנאים ממוצעים בכל המקומות האפשריים	קצרת חיים נסחפת באקראי	קביעות צורה אחידות צורה סימטריה כדורית כמעט מושלמת	קרנונית שמשית	
הסתגלות לתנאים הממוצעים השוררים לאורך הזמן למעלה ולמטה (יש הבדל).	מאריכה חיים נצמדת למקום אחד	קביעות צורה אחידות צורה סימטריה מעגלית	פטרייה	
הסתגלות לתנאים הממוצעים השוררים לאורך הזמן בכל צד אופקי (אין הבדל).				
הסתגלות לתנאים הממוצעים השוררים לאורך הזמן למעלה ולמטה.	מאריך חיים נצמד למקום אחד	קביעות צורה חלקית במהלך החיים	פיקוס	
הסתגלות לתנאים הממוצעים המקומיים השוררים לאורך הזמן בכל צד אופקי.				
הסתגלות לתנאים המשתנים משעה לשעה.	משך חייו קצר מזה של הצמח כולו נצמד למקום אחד אבל יכול לשנות את כיוונו	קביעות צורה אחידות צורה סימטריה דו-צדדית	עלה	
הסתגלות לתנאים הממוצעים השוררים לאורך הזמן למעלה ולמטה.	מאריך חיים נצמד למקום אחד	קביעות צורה אחידות צורה סימטריה רדיאלית	אשוח	
הסתגלות לתנאים הממוצעים הגלובליים השוררים לאורך הזמן בכל צד אופקי.				
		קביעות צורה אחידות צורה סימטריה דו-צדדית	עלה	

	מאריך חיים נע באופן רצוני לצד קדמי	קביעות צורה אחידות צורה סימטריה רדיאלית	מדוזה
	מאריך חיים נע באופן רצוני עם כל צד גוף	קביעות צורה אחידות צורה סימטריה כמעט רדיאלית (מחומשת)	קיפוד ים כוכב ים
	נע באופן רצוני עם צד גוף מועדף	סימטריה דו-צדדית	רב-תאיים מפותחים (פרוקי רגליים, בעלי חוליות וכו')
	נסחף באקראי בזרם הדם	סימטריה כדורית	תא דם

ומה אומרת צורת העלה?

עכשיו המקום לדון ברמה אחרת של שימור צורה. אני מתכוון לאותם אורגניזמים שצורתם הכללית אינה אחידה ואינה סימטרית אבל היחידות הקטנות יותר שמהן הם בנויים הן אחידות וסימטריות. הנה לדוגמא הצמחים. צורת הצמח, כפי שכבר שמנו לב, בדרך כלל אינה אחידה וגם אינה סימטרית. ההסבר האבולוציוני שהצענו לתופעה זו פשוט: הצמח נמצא במקום אחד כל חייו, וצריך להסתגל רק לתנאים המרחביים של אותו מקום. תנאים אלה אינם אינווריאנטיים וגם לא סימטריים: שיח הגדל במקום מסוים, נמצא ליד סלעים מסויימים ובשיפוע מסויים, ואלה משתנים ממקום למקום ומצד לצד. לכן אין שום סיבה ששיח זה ידמה בצורתו לשיחים אחרים או שיהיה סימטרי.

והנה, בניגוד לצורת הצמח כולו, העלים שלו הם בדרך כלל גם בעלי צורה אחידה וגם סימטריים. זה בוודאי איננו מקרי, ולכן השאלות ששאלנו קודם, של שימור הצורה של האורגניזם כולו, חוזרות ונשאלות גם במקרה הזה. כאן, אני סבור, יש תחום מרתק מאוד שעדיין לא נחקר דיו.

הרשו לי להתחיל בווידוי. מכל הדרכים שבהן נוהג ה"הומו ספיאנס" להתערב במהלכי הטבע יש נוהג אחד, תמים לכאורה, שפוגע בי ממש באופן אישי. אני מתכוון לנוהגם של בני האדם... לגזום עצים. אתם בוודאי מתפלאים מה כל כך פוגע פה, מה יותר טבעי מלגזום עץ? הנה, אני שוב מתחיל להתרגז. בעיניי, עץ בוגר, זקן, שהגיע למלוא התפתחותו, הוא אחד הפלאים הגדולים של הטבע, וכל ניסיון לתקן אותו פוגע בי ממש כמו שאוהב אמנות יזדעזע אם יראה מישוהו מנסה "לתקן" ציור של רמברנדט. יש בצורתו של העץ הזקן מין אצילות כזאת, מין יופי פנימי כל כך עמוק שגורם לי להבין מדוע נהגו קדמונינו לסגוד

לעצים זקנים כמו לאלים. ואיני מבין איך אנשים מעזים "לשפר" את הצורה השלמה הזאת באמצעות המזמרה או המסור.

האם מדובר רק על עניין של טעם אישי? נניח לרגע לאסתטיקה ונתבונן בשאלה מבחינה הנדסית טהורה. בוודאי תסכימו אתי שבצורה המלאה של העץ יש מידה רבה של תחכום פיזיקלי: איך נוצר מבנה כה ענק ועם זאת כה יציב למרות כוח המשיכה המאיים למוטט את הגזע והענפים? ואיך הענפים נמנעים מלגדול זה לתוך זה ולעקם איש את רעהו? ואיך מסודרים הענפים והעלים כך שכל העלים יקבלו כמות מיטבית של אור שמש? הצמח ניצב בפני מגוון עצום של בעיות שונות וסותרות, בעיות שצורתו האינדיווידואלית השלמה של העץ הבוגר נותנת להן פתרון מיטבי. כל מהנדס שיחשוב על כך לא יוכל שלא להתמלא הערצה כלפי התחכום של הקמת מבנה כל כך גדול שצריך לספק דרישות כה רבות לאורך ימים. ואני חושב שהשאלה מדוע העלים של העץ הם בעלי צורה קבועה, כלומר אחידה וסימטרית, קשורה לעניין צורתו של העץ ומביאה אותנו לכמה תופעות מעניינות בביולוגיה.

סקרנותי בעניין זה גברה כשקראתי פעם מאמר מרתק של פרופ' אבישי שמידע מהאוניברסיטה העברית. הוא ציטט עבודות של חוקר ששמו היינריך (Heinrich) שהציע את ההשערה הזאת: עצים רבים סובלים מחרקים שזוללים את העלים שלהם בלי חשבון. למזלם של העצים, יש ציפורים רבות שאוכלות את הטפילים האלה, וכך הן עוזרות לעץ. אם כך, הרי שיש לעץ אינטרס שהציפור תדע איזה מהעלים שלו נפגע מידי החרקים. עכשיו בואו נחשוב: כשאנחנו מסתכלים בעלה ורוצים לדעת אם מישוה כרסם אותו, מתי יהיה הדבר קל יותר? כמובן, בעלים סימטריים כל פגיעה מורגשת יותר. ההשערה של היינריך הייתה, אם כן, שהסימטריה של העלים נועדה להסגיר לעין הציפור את העלים שנפגעו מידי הטפילים, ובכך להזמין אותה לחסל את הרשעים הקטנים.

להשערה הזאת מצא היינריך שלושה תימוכין, כל אחד מרתק ממשנהו:

א. יש עצים, כדוגמת האלון, שהעלים שלהם אינם סימטריים. והנה, דווקא העצים האלה חסינים בפני חרקים אוכלי עלים.

ב. יש טפילים המתפעלים ממש כמונו מהסימטריה של העלה: כשהם מכרסמים אותו הם מקפידים לקחת "ביסים" במידה שווה משני הצדדים, והעלה המסכן נשאר סימטרי אף על פי שהוא הולך ומצטמק, כך שלציפור קשה להבחין במשהו חריג.

ג. היינריך לקח עצים וגזר את העלים שלהם כך שלא יהיו סימטריים, ומצא שציפורים אוכלות-חרקים פקדו את העלים האלה יותר מאשר את העלים האחרים.

הלכתי לפגוש את שמידע ויצאתי נשכר. גיליתי שהוא עובד זה שנים רבות על שאלת תכולת המידע של פרחים, וגם הוא מתעניין בקשר שבין הערך האסתטי של פרח לבין דרגת הסימטריה שלו. התחלנו להחליף מחשבות בעניין הזה, והגענו להשערה על קביעות הצורה והסימטריה של העלים, קביעות צורה שבעצם מרחיבה את הרעיון של היינריך לטענה כוללת יותר. על פי ההשערה של היינריך, הסימטריה של העלים היא דרך שבאמצעותה העץ מעביר מידע לציפורים הידודיות.

ההשערה שלנו הייתה שהקביעות והסימטרייה של העלים הן גם דרכים שבאמצעותן הצמח קולט מידע במהלך התפתחותו.

האם צמחים מבצעים מטלות חישוביות?

עלים כאמצעי לקליטת אינפורמציה? אני מודה שהרעיון נשמע מופרך ממבט ראשון. אבל רק בעת האחרונה מתברר כמה מורכבת התקשורת הפנימית בין חלקיו השונים של הצמח המתפתח, המאפשרת לחלקי העץ השונים ליצור יחד צורה מאוזנת. כך התגלו האוקסינים, תרכובת שמפריש הנצר המתפתח והמשפיעות על עיכוב הגידול של נצרים מתחרים, על גידול השורשים וכדומה. תופעה מרתקת אחרת היא יכולתם של העלים לזהות את העצם המפיל עליהם צל: עצים מגיבים לצל הנופל עליהם מעצם דומם בצורה שונה מהצורה שבה הם מגיבים לצל הנופל עליהם מעץ אחר, שכן אורכי הגל של האור שונים בשני המקרים! אם כך, כדאי לנו שלא לזלזל ביכולתו של הצמח "לראות" את סביבתו באמצעות עליו ולעבד את המידע הזה באמצעות המערכת המורכבת של אוקסינים (הורמונים צמחיים) העוברים בתוכו. פרופ' צבי זקס ז"ל מהאוניברסיטה העברית, שספרו "משמעות הצורה בצמחים" (הוצאת האוניברסיטה המשודרת, 1987) עוסק בתופעות המרתקות הללו, שיער שקיימים אותות רבים נוספים כאלה בתוך הצמח המתפתח.

שאלתנו נעשית עתה ברורה יותר: האם הקביעות בצורת העלה משרתת את תהליכי הכרת הסביבה לצורך עיצוב צורתו של הצמח? עמדנו קודם על הקושי ההנדסי העצום הניצב בפני העץ המתפתח להשגת צורה יציבה ואיתנה המתאימה לסביבה שבה הוא נמצא. העץ צריך לדעת מהם כיווני האור בסביבה שבה הוא גדל, מהי השפעתו של כוח המשיכה בכל נקודה ונקודה, מה כיווני הרוחות הממוצעים בשדה שבו הוא נמצא, האם יש מכשולים המפריעים לו לגדל ענפים בכיוונים אלו או אחרים, וכך הלאה. זהו מידע שעבודו מצריך פעולת חישוב ניכרת. אם העלה מעביר לעץ במגוון דרכים מידע על התנאים האלה של אור, רוח וכוח המשיכה, הרי מה שהעץ צריך לעשות הוא דבר פשוט: הוא צריך לעשות מעין ממוצע של האותות שמעבירים אליו כל העלים מכל הענפים כדי לדעת את התנאים השוררים בסביבתו. מסך כל האותות האלה לומד העץ מהם הכיוונים המתאימים לגידול ענפים. השיקול פשוט: קל יותר לגדל עלים מאשר ענפים. העלה נושר ומתחלף, ואילו הענף נותר קבוע במקומו ובצורתו ורק עוביו יכול להשתנות. העלים יכולים, אם כן, לשמש ניסיונות גישוש ראשוניים שבעקבותיהם מגיע העץ ל"החלטה" המיטבית בדבר הצורה הקבועה שתהיה לענף המתפתח.

אם כך, באיזו מידה העלים ימלאו טוב יותר את התפקיד הזה של העברת האותות שמהם ימצא העץ את הגודל הממוצע? האם אלו צריכים להיות עלים שונים או דומים זה לזה? ההיגיון אומר שכדי להגיע לממוצע מדויק, רצוי שלא יהיו הבדלים בין העלים עצמם. הם צריכים להיות אחידים עד כמה שאפשר. העץ היה יכול, כמובן, לגדל עלים בעלי צורה גמישה השולחת מאליה זרועות ושלוחות

לכיוונים שבהם יש שפע של אור, ממש כפי שהוא עושה עם ענפיו, אבל גמישות כזאת של צורת העלים הייתה באה על חשבון האפשרות לעשות שקלול אמין של כמות האור שקולט כל עלה. להמחשת הדברים, תארו לעצמכם שאתם רוצים לעקוב אחרי תהליכי זיהום האוויר באזור מסוים. בוודאי תיקחו דגימות אוויר מאתרים שונים באותו אזור, וגם תחזרו ותיקחו את הדגימות מאותם אתרים בשעות שונות של היום. מובן שאם רצונכם בהשוואות אמינות, הדגימות חייבות להיות שוות בכל הגדלים שאינם נוגעים ישירות לגודל הנבדק, קרי הזיהום. לכן, גודל הדגימות חייב להיות שווה, שיטת הבדיקה חייבת להיות שווה, וכך הלאה. אחרת, ההבדלים בדגימות יהיו גורם מבלבל ולא יתנו ממוצעים אמינים. אם כן, ההשערה שהעלים ממלאים בנוסף על תפקידם הפוטוסינתטי גם תפקיד של אברי חישה פשוטים, מסבירה את אחידותם.

שיקול זה פותר לנו גם את החידה השנייה של קביעות הצורה בעלה, לאמור – הסימטרייה. כאן הטבע בא לעזרתנו בתופעה מעניינת: בצמחים רבים אנחנו רואים שהעלה עוקב אחרי כיוון השמש במהלך היום. הסתכלות במבנה העלה נותנת רמז משלים. העלה מחולק לאורכו לשני חצאים. בצמחים רבים, שני החצאים האלו אינם על אותו מישור בדיוק, אלא יש ביניהם זווית שהיא קצת פחות מ-180 מעלות, מה שאומר שכל מחצית מקבלת קרינה בזווית שונה מעט. נניח עתה שהעלה שואף להימצא במצב שבו קליטת הקרינה היא מרבית, כלומר בניצב לכיוון הקרינה. לאור מה שמצאנו, זו משימה פשוטה: העלה צריך להימצא בזווית שבה שני חצאיו מקבלים כמות קרינה שווה. בעלים שחצאיהם נמצאים על אותו מישור פועל כנראה מנגנון פשוט יותר, מנגנון של השוואת כמות הקרינה הנספגת בשני החצאים.

ועכשיו בואו נשאל: מתי יבצע העלה את תפקיד מציאת הזווית המיטבית טוב יותר, כאשר שני החצאים שלו שווים או שונים זה מזה? ברור כי רק חצאים שווים יוכלו לבצע השוואה אמינה. דבר דומה מתגלה במבנה האנטנה. אנטנה טובה היא אנטנה ששני הצדדים שלה במישור הניצב לכיוון הקרינה שווים. מסיבה זו יש אפילו אנטנות בצורת צלחת, שהסימטרייה שלהן היא סימטרייה מעגלית מושלמת. מסיבה דומה יש גם עלים לא מעטים שצורתם שואפת לצורת העיגול (אני חושב, לדוגמא, על עלה של כובע הנזיר או של חלמית), ומעניין שבעלים אלה הפטוטרת נראית כיוצאת לא מבסיס העלה אלא מאמצעו, והעלה מסוגל להסתובב במשך היום על יותר ממישור אחד. תימוך נוסף להשערה זו מספקים מיני הפרחים (כמו החרצית) העוקבים במהלך היום אחרי השמש: גם הם לעתים בסימטרייה מעגלית מושלמת.

כאן המקום להזכיר כי לעומת הסימטרייה ימין-שמאל של העלה קיימת אסימטרייה בין חלקו העליון והחתות: יש מספר שונה של פיוניות בכל צד, וזאת משום שהצמח צריך להחליף גזים עם הסביבה אבל ריבוי פיוניות בצד החשוף לשמש יגרום לו גם איבוד מים. שוב: העלה אסימטרי במישור שבו הסביבה כולה אדימטרית, וסימטרי במישור שבו, באופן הסתברותי, שולטת הסימטריה בסביבתו.

אנו משערים, אם כן, שקביעות הצורה של עלי הצמח והסימטרייה שלהם ממלאות תפקיד חישובי בתהליך שבו מפתח הצמח את צורתו המיטבית. למעשה, אפשר לומר שהסימטרייה של העלה נובעת מאותה סיבה שביסוד הסימטרייה של מערכות החישה שלנו: **יש לנו שתי עיניים שוות, ושתי אוזניים שוות, הממוקמות באותם מקומות משני צידי הראש, כי רק כך נוכל להעריך נכונה זוויות ומרחקים.** את ההשערה הזאת הצגנו שמידע ואני בכינוס של החברה הבינלאומית הבין-תחומית לחקר הסימטרייה (יש דבר כזה) שהתקיים בווינגטון בקיץ 1995, ולשמחתי הגיבו הבוטנאים שבחבורה בעניין אוהד להשערתנו.



איך יודעים גזעי דקל התמר לגדול לכיוונים שונים כדי שלא יפריעו זה לזה? ואיך יודעים גזעי הדקלים שעל החופים הטרופיים לגדול לכיוון הים כדי לקלוט מפני המים מנה נוספת של אור? על פי ההשערה המוצעת כאן, בכל עץ אלה הם העלים העושים יחד את עבודת החישה, המדידה וההשוואה בין מידות האור, הטמפרטורה והכבידה מהכיוונים השונים, כך שהגזע מכוון את גידולו לפיהם.

הדרכים לבדוק השערה זו אינן מסובכות. אפשר, למשל, לעשות ניסויים דומים לאלה שעשה היינריך, כלומר לגזור את עליהם של צמחים בצורה שתפגע באחידות הצורה שלהם או בסימטרייה שלהם, ולראות אם צורתו הכללית של הצמח המתפתח משתנה כתוצאה מהתערבות זו.

התעכבתי על צורת הצמח מפני שבניגוד לבעל-החיים, שתקופת עובריותו מתרחשת בהיחבא והוא יוצא לאוויר העולם כיצור מוגמר, הרי הצמח, בחלקיו המתחדשים, חוזר ומציג מצב עוברי המאפשר לנו להתבונן מקרוב בפלא המתמיד הזה של התהוות הצורה. נושא מרתק אחר למחקר הוא מדוע לצמחים מסוימים יש עלים עם צורות כל כך מיוחדות: מדוע, למשל, צורתו של עלה התלתן מצטיינת במבנה המשולש המפורסם? ומדוע לעלי הקיקיון יש צורה כה מורכבת ורבת אצבעות הנפרשות לכל הכיוונים? ומה עם אינספור צורות העלים המשוננים, הכינוריים והמחודדים? משנפנה מצורת העלה היחיד אל צורת הענף, נבחין שגם אופן סידור העלים של הענף משתנה ממין למין – לעתים הוא סימטרי ולעתים זיגזגי, וגם צורת הענפים מגלה גיוון כזה. בלא ספק, קיים יחס מתמטי קבוע בין הגדלים השונים האלה, יחס המבטא את אסטרטגיית הגידול המיטבית של כל מין ומין. צורת העלה, המיוחדת לכל מין והמגלה לעתים מורכבות מפליאה, רומזת לנו ששום דבר אינו מקרי בתופעות אלו. כל שלל הצורות הללו הוא פרי ברירה טבעית קשה ובת מיליארדי שנים, וצפונה בה תבונה רבה המצפה לכל החפץ להבינה.

סימטרייה ומידע בעולם החי

הסימטרייה בבעלי-חיים נעשית מרשימה במיוחד כאשר היא משרתת את אידיאל היופי של בעל-החיים, כלומר את המשיכה בין המינים. סימטרייה זו הניבה בעת האחרונה כמה תגליות. א"פ מולר (Moller) מצא שסנוניות נקבות מעדיפות את הזכרים בעלי הצורה הסימטרית יותר, וסבר שהסימטרייה מעידה על כשירותו ובריאותו של הזכר. סברה זו מתיישבת יפה עם מה ששמענו לעיל מהיינריך, האומר כי הא-סימטרייה של העלה מעידה על חולניותו. לעומת זאת סבורים אנקוויסט (Enquist) ואראק (Arak) כי ההעדפה לבני זוג סימטריים נובעת מהעובדה שצורה סימטרית קלה יותר לזיהוי מצדדים שונים. גם טענה זו, נראה לי, מתיישבת עם הטענה הכללית יותר שהעליתי במאמר זה: אם סימטרייה בדגם הצבעים של בעלי-חיים כלשהו עושה את הדגם קל יותר לצפייה מצדדים שונים, קל וחומר שמבנה סימטרי עושה את הגוף כשיר יותר לאינטראקציה עם הסביבה מצדדים שונים. ואמנם, רידלי (Ridley), שבדק שתי השערות אלו על מינים אחדים, מצא תימוכין לשתייהן.

ההשערה שמערכת ביולוגית מסוימת, שתפקידה כבר ידוע, ממלאת תפקידים של עיבוד מידע, נשמעת מופרכת ממבט ראשון. כולנו יודעים, למשל, שתפקיד העלים הוא ביצוע פוטוסינתזה. מדוע, אם כן, להאמין שחש להם גם תפקיד חישובי? אבל מאז שהתחלתי ללמוד את התפקיד שממלא המידע בהתפתחות החיים, שמתי לב עד כמה רבות המערכות שהן בעלות תפקיד פיזיולוגי מוגדר ועם זאת הן

ממלאות תפקיד הקשור במידע. כולנו יודעים, לדוגמא, מה תפקידה של מערכת הדם במוחנו: היא מביאה למוח חמצן ומזון. ואולם, בנוסף, על תפקיד ידוע זה, הדם מעביר למוח גם מידע חשוב על מצב הגוף. במוח ממוקמים מרכזים רבים של משוב המווסתים את חום הגוף, את משק המים, את רמת הסוכר וכדומה, ומרכזים אלו משתמשים במערכת הדם כאמצעי לקבלת המידע הדרוש לפעולתם. זוהי דוגמא למנגנון פיזיולוגי שבמרוצת האבולוציה נטל על עצמו גם תפקיד של העברת מידע. דוגמא מוכרת הרבה יותר היא התקשורת הקולית בין בעלי-החיים, תקשורת שהתפתחה כאמצעי להעברת מידע רק אחרי שמערכת הנשימה התפתחה למילוי תפקידה הראשוניים. מודלים חישוביים מיושמים בשנים האחרונות בחקר האנזימים, מערכת החיסון ומערכות אקולוגיות.

מורי למתמטיקה שלמה אלוני היה נוהג להפטיר בסוף שיעור מייגע: "טוב, זו הייתה ההקדמה למבוא של הפתיחה". המורפוגנזה (תורת התהוות הצורות) היא עדיין אחד השטחים הבתוליים של הביולוגיה, וכאן רק נגענו בשוליה. כך או אחרת, בכל מקום שבו החיים מציגים לעינינו צורה בעלת יופי מיוחד, יכולים אנו להיות בטוחים שמתחבאות שם הרבה שאלות מדעיות מעניינות, וצריך רק לדעת איך לשאול אותן.

נספח: תרגומיהם של גרוסמן ורייכמן ל"הנמר"

ממעבדת התרגום של דורי מנור צילמתי להלן שני תרגומים בשלמותם. השני, זה של רייכמן, גרם לי לצחוק בקול, ואני מקווה שלא אשמע אנטישמי אם אסביר למה. בעוד גרוסמן מצליח להעביר את תחושתו של הג'נטלמן הבריטי חובב האקזוטיקה העומד נפעם מול החיה האדירה, בחר רייכמן דווקא בעמדה גלותית. כמעט שאפשר לראות יהודי עומד בגן-החיות מול כלוב הטיגריסים וממלמל: "אוי ויי איז מיר! אילו חטאים עשינו, ריבוינו של עוילם, שבראת כנגדנו כל מיני וילדע-חיים ושוורצע-חיים שכאלה?"

הנמר
ראובן גרוסמן

נמר, נמר, עיניך-גור
ביער-ליל, זה בו תגור
אי יד-האלז איז עין-יה
עצבה דמותך-אימים חיה?

אי תהום רבה, אי שחק יש
כס כערו עיניך-אש?
איוה כנף רום זה תשג?
איוה תיד אש זה תח-קע?

אי הא זרוע, הא זנים,
שרידי-לפך קשר איתנים?
ומי הלמו כך הפעים?
איוה הנלז יד-אימים?

אי הקרנז? אי הכליים?
ככשן זה מתד השלים?
הסרן איז? אי אגרוף-עו
העו אימי-כלייה אחוז?

כזק את כידונו כוכב,
שכף כדמע רצפת-עב,
השש קנך ביציר-כפיו?
יצר השעה הוא גם לך אב?

נמר, נמר, עיניך-גור
ביער-ליל, זה בו תגור
אי יד-האלז איז עין-יה
עצבה דמותך-אימים חיה?

מבחר שירת אנגלית -
מסדה תש"כ



הנמר
חנה רייכמן

הוי, נמר, לפיד אימת,
הבוער באש-חמה!
איו עין, איו יד
יצחק, פחד-ער?

אי יקר, בתהום או רום,
כרס עיניך האים?
מי חקו ביד-כוכש
לאחו בוו תאש?

מי צרף ומי שור
שרידי לב כל-קד אקור?
אד יצרו לא נע מחיל
עת הופק בו התחיל?

אי ככשן אשר התכה
בו מפלצת מתד?
אי פמיש וסרן-השואל
שיכלו אותה לחסל?

צבא מרום ודאי נכד...
השטח בורא?
האמנם אותך עשה
זה אשר כרא ככשה?

הוי, נמר, לפיד אימת,
הבוער באש-חמה!
איו עין, איו יד
חולקו, פחד-ער?

1964 "משירת העולם"
יוסף שריכר

Piatigorsky, J. (2008) A Genetic Perspective on Eye Evolution: Gene Sharing, Convergence and Parallelism. *Evolution: Education and Outreach* 1: 403-414.

-
1. מנור, ד. (1993) מעבדת תרגום: ויליאם בלייק, הטיגריס. אב, 1: 19-21.
 2. סטיוארט, א. וגולוביצקי, מ. (2001) סימטריה נוראה: האם אלוהים הוא גיאומטריקן? תל אביב: זמורה ביתן.
 3. Rosen, J. (2008) *Symmetry Rules: How Science and Nature are Founded on Symmetry*. New York: Springer.
 4. Neal, R. E., Dafni, A., and Giurfa, M. (1998) Floral symmetry and its role in plant-pollinator systems: Terminology, distribution, and hypotheses. *Annu. Rev. Ecol. Syst.*, 29: 345-73.