

מה הם חיים

ד"ר פליקס לאוב

כמה פנים לשאלה שבכותרת:

- לשאלה משמעות היסטורית, והיא אף היוותה את כותרתו של ספרו המפורסם של ארוין שרדינגר, אחד מבכירי הפיסיקאים של המאה ומיוצרי מכניקת הקוונטים. התשובות שנתן שרדינגר בשנת 1944 כבר אינן מספקות היום, אולם עצם העלאת השאלה על-ידי שרדינגר עורר עניין בביולוגיה אצל דור שלם של פיסיקאים, וחלקם אכן פנו למחקר ביולוגי ותרמו תרומה מכרעת ללידתה של הביולוגיה המולקולרית (פרנציס קריק היה תחילה פיסיקאי).
- השאלה מפתיעה, אולי אף מביכה, שכן הביולוגיה מתקשה להגדיר את נושא עיסוקה (מדע החיים).
- השאלה מורכבת למדי (כפי שיתברר כאשר מנסים לחדד אותה מעט).



חי ודומם. צילום: מירה משולם

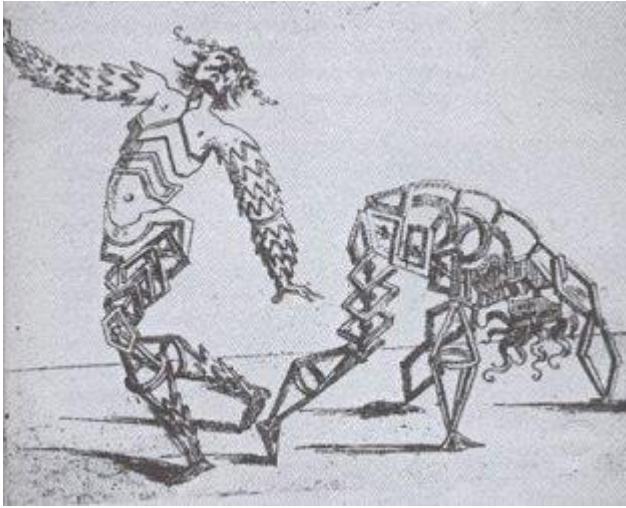


קשר לנושא לימודי:
תופעות, מבנים
ותהליכים ביצורים
חיים
ולחידות: "נאפיין
חיים" - משמו"ן
ו"עיינו חיים" -
משלוש המוחו"ט

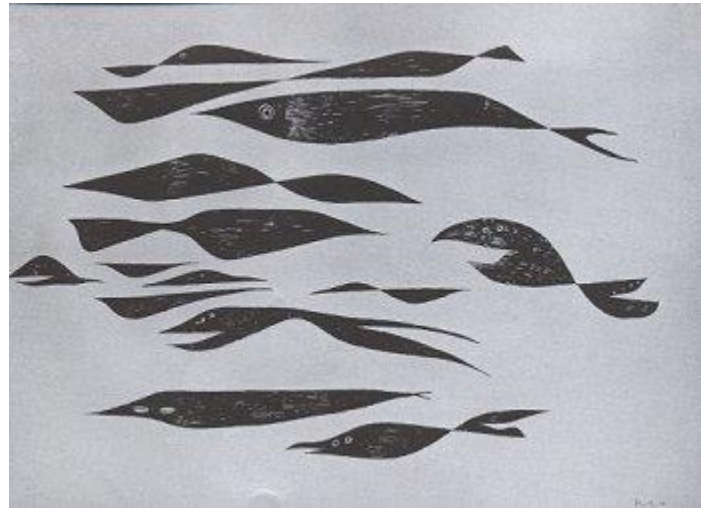
ד"ר פליקס לאוב מנהל
תוכניות העשרה רב-
תחומית
ביחידה לפעולות נוער
במכון ויצמן למדע

נתחיל בניסיון להגדיר יצור חי (אורגניזם חי) - דבר-מה ממשי (בניגוד למושג החיים, העלול להיתפס כמופשט, ואולי פילוסופי חלילה). אינטואיטיבית נראה שיש לבחון מה מבדיל בין יצור חי לדומם (אבן, שלולית, גבעה וכו'). אולם מה בדבר יצור, שהיה חי עד לפני זמן קצר (כלומר יצור מת)? האם הוא דומם (משול לאבן)? ובהקשר זה, מה דינו של חיידיק (או אפילו צפרדע) הנשמר בהקפאה עמוקה (cryopreservation) לחזור ולחיות, אם וכאשר יופשר? האם יצור כזה חי או מת? ומה אם היצור מת לפני מיליוני שנים והפך למאובן - כיצד נתייחס אליו: אבן? חי? ומה דינו של חלק מהחי (תא, איבר)? נניח שלבו של אדם, שזה עתה נפטר, נלקח להשתלה בחולה הנמצא בעיר מרוחקת. מה מצבו של הלב כל זמן שהוא נמצא בדרך בין שני הגופים? באיזה מובן אפשר להגיד שהלב חי? ומה לגבי תא עור או כבד או סרטן, חס וחלילה, המתרבה בתרבית רקמה? ודאי שהוא תא חי, אבל האם הוא גם יצור חי, כמו אמבה או סנדלית? ואם לא - מה ההבדל ביניהם? ואם נותק אותו תא לא מעוררו של יונק - אלא מ"צלחת" של מושבת וולווקס? או אם נותקה רקמה משלשול או כוכב-ים (רקמה זו משחזרת את היצור שממנו נלקחה) - האם תא כזה או רקמה כזו דומים יותר ליצור חי?

בהקשר דומה: האם יש לגמטות מעמד מיוחד? תאי זרע וביצית, הנמצאים מחוץ לגוף בדרכם אל המפגש הגורלי - מה מעמדם? ברור שהיו חלק מחי לפני עזיבתם את הגוף, ונניח שייעשו יצור חי אחרי המפגש - מה דינם בשלב המעבר?



תנועה, ברצל'לי (Bracelli), המאה ה-17.
מקור : Reiser, D. (1972) Art and Science. Studio Vista; London



דגים נודדים, פאול קליי, 1926,
מקור : Cooper, D. (1949) Paul Clee. Penguin Books

ואם כבר עוסקים בנושא, מה לגבי יצורים העוברים מטמורפוזת מחזור החיים שלהם? האם ראשון הוא יצור חי? וגולם? לבסוף נציין, שגם בעולם הדומם ראוי לערוך לפחות הבחנה אחת: בין אבנים ודומיהן מצד אחד, לבין ארטיפקטים (artifacts) - שהם יצירות של יצורים חיים (כוורות, קני ציפורים, קורי עכביש, קונכיות) - וכל פלאי הטכנולוגיה האנושית, מהאבן המושחת של האדם הקדמון עד לרובוט המטייל על פני הירח, מצד אחר. לבסוף נטען שהשאלה שהועלתה היא בעצם טפשית, משום שאינטואיטיבית כולנו יודעים את ההבדל בין יצור חי לדבר-מה שאינו חי (We know it, when we see it!) זו עמדתם של מדענים רבים, המעדיפים לחקור את תופעות החיים - במקום להתפלסף בלי סוף על הגדרות שאין בהן צורך.

זו גם עמדת המוצא של ז'ק מונו (Jacques Monod, 1910-1976) חוקר צרפתי שזכה בפרס נובל על פענוח אופן פעולתה של מערכת לבקרת גנים. בספרו הפופולרי **Chance and necessity** מציע מונו שנדמיין מצב, בו לא ניתן להיעזר באינטואיציה. נניח שהצלחנו להנחית רובוט על פלנטה רחוקה, והטלנו עליו לגלות אם יש עליה חיים. לרובוט אין אינטואיציות ולכן יש לתת לו הגדרה מדויקת, שתאפשר לו להבדיל בין יצורים חיים לאלה שאינם חיים. כדי לבדוק את תקפות ההגדרה נאפשר לרובוט לטייל על-פני כדור-הארץ בטרם שיגורו אל הפלנטה הרחוקה. אם יזהה אבנים כחיים - טעינו. אם יזהה עצים כדוממים - שוב טעינו! אני מציע לערוך דיון עם התלמידים בשאלת תכנותו של הרובוט, כלומר מציאת קריטריונים להבחנה בין יצורים חיים לאלה שאינם חיים. בשורות שלהלן ננתח חלק מן האפשרויות. דיונו מושפע מדיון דומה, שעורך מונו בפרק הראשון של ספרו.

לגבי כל מאפיין אפשרי של חיים נשאל שתי שאלות:

א. האם הוא מאפיין את כל היצורים החיים?

ב. האם הוא מאפיין רק יצורים חיים?

צירופי התשובות לשאלות אלה יוצרים ארבע אפשרויות, שניתן לתארן במטריצה כדלהלן:

מאפיין את כל היצורים החיים? (תנאי הכרחי)

כן	לא	
		לא
		כן

מאפיין רק יצורים חיים (תנאי מספיק)

המשבצת הימנית העליונה מספקת, כמובן, במידה הקטנה ביותר: מצאנו מאפיין, המתאים רק לחלק מהיצורים החיים, כלומר הוא תנאי לא הכרחי, ובנוסף לכך הוא מאפיין גם דוממים שונים. אין הוא תנאי מספיק, ולא נוכל להחליט לפיו אם יש חיים בפלנטה שלנו.

גם המשבצת השמאלית העליונה לא מקדמת אותנו בהרבה: מאפיין כזה אומנם מתאים לכל היצורים החיים, אבל גם לדברים שאינם חיים. כך לא יוכל הרובוט להחליט אם ה"יצור" שבדק חי או לא. כדאי לשים לב: שלילה של קריטריון כזה מאפשרת קביעה ודאית: אם מצאנו שנושא הבדיקה שלנו חסר מאפיין כזה - הוא לבטח לא חי.

במשבצת הימנית התחתונה השגנו התקדמות רצינית, כי המאפיין כאן מתאים רק ליצורים חיים - אם כי לא לכולם. אם התמזל מזלו של הרובוט ומצא מאפיין כזה, הוא יוכל לקבוע בוודאות שמדובר ביצור חי. אולם גם זה לא לגמרי מספק. היעדרו של המאפיין ישאיר אותנו בחוסר-ודאות גמור, לכן הרובוט לא יוכל לקבוע אם דוגמה כלשהי היא יצור חי או לא, אם אין לה מאפיין זה (ייתכן שצריך לשנות מעט את משימתו של הרובוט ולדרוש ממנו שימייין באופן חד-משמעי יצורים לחיים ולכאלה שאינם כאלה, או שימצא את כל סוגי החיים על הפלנטה הרחוקה). גם לא היינו רוצים כל-כך לסמוך על המזל. אולי המאפיין המספיק שמצאנו נדיר מאוד על הפלנטה הזרה או אולי כלל לא קיים שם?

הגענו אפוא למסקנה המאוד לא מפתיעה: **אנחנו זקוקים למאפיין של המשבצת השמאלית התחתונה, כזה המשותף לכל היצורים החיים, ורק להם: גם הכרחי וגם מספיק.**

עתה נראה שקשה מאוד למצוא מאפיין יחיד כזה. גם מציאת צירוף של שני מאפיינים, שיסתכם בהכרעה חד-משמעית, אינה קלה כלל ועיקר.

תנועה

לעתים תנועה היא ההצעה הראשונה שעולה. אך יש להבחין מיד בין שתי משמעויות של המונח:

- תנועה שבה מעתיק היצור כולו את מקומו: translocation.
 - תנועה ללא העתקת מקום, כמו צמיחה, הטיית פרח לכיוון השמש ותופעות של הובלה בתוך היצור החי.
- במובן השני אכן מאפיינת תנועה את כל היצורים החיים - אך בוודאי לא רק אותם: גבישים יכולים "לצמוח" כמו בניסוי "גן כימי". זקפים ונטפים במערות הם דוגמה יפה לתהליך כזה - אם גם אטי מאוד, ושלל מכוונות מעשי ידי אדם כוללות מערכות הובלה וכו'. במובן הראשון - העתקת מקום של היצור כולו, ודאי שאין התנועה מאפיינת את כל היצורים החיים: הרי צמחים, ספוגים, ויצורים נוספים לא זזים ממקומם.

האם תנועה היא תנאי מספיק?

חלוקי נחל "נעים" במורד הנהר עם זרם המים, עננים חולפים על פנינו, וחלקיקים זעירים מבצעים ריקוד בראוני (brownian motion) במורד הנהר או בגזים (אף שספק אם הרובוט שלנו יצויד במיקרוסקופ, שיאפשר לו לצפות בתנועה כזאת). דוגמאות אלה מחייבות את ההבחנה המתבקשת בין תנועה סבילה (פסיבית) לבין תנועה פעילה, עצמית (כאילו בעזרת מנוע פנימי). במבט ראשון נראה שכך נישאר רק עם יצורים חיים וארטיפקטים מסוימים מעשי ידי אדם: מזל"טים, טיסנים, מכוניות צעצוע ודומיהם. כמובן, ארטיפקטים הם מקרה "פחות חמור" של דומם, שכן הם מעידים לכאורה על קיומו של היצור החי שבנה אותם (אך בהקשר למשימת הרובוט אולי לא יספקו, כי ייתכן שהיצור החי שיצר את הארטיפקטים נכחד בינתיים או שבא בכלל ממקום אחר, שהה בפלנטה "שלנו" זמן קצר בלבד והשאיר אחריו שלל צעצועים מתנועעים).

קיים גם סוג של תנועה, שמבצעות טיפות שומניות על-גבי תמיסות מימיות - בעיקר כאשר אחד המרכיבים טעון חשמלית. הדוגמה הבולטת לכך היא "האמבה הכימית" (טיפות של ציקלו-הקסנול על-גבי תמיסה מימית של ביכרומט וחומצה גופרתית - ראו פירוט משמאל). אפשר לטעון שגם זו בעצם סוג של תנועה סבילה, אבל נתקשה לשכנע את הרובוט וגם את תלמידי חטיבת הביניים שכך הדבר.

דרושה אולי אבחנה נוספת בין תנועה מכוונת (מלשון כיוון), המכונה טקסיס (chemotaxis), (מלשון כיוון), האמבה הכימית מהדגם, אך תצמצם מאוד את מאגר האורגניזמים החיים, שכן לא כל היצורים מבצעים תנועה מכוונת כל הזמן, ודי קשה לצפות בה.

אבחנה מעניינת יותר ומשמעותית ביותר עשויה להיות בין תנועה הנפסקת ומתחדשת לסירוגין - לבין תנועה הנפסקת אחת ולתמיד. (למען האמת נשארים עדיין ארטיפקטים משוכללים במיוחד - רובוטים משוכללים העשויים להתאפיין ביכולת זזין יתרה מזו. בהגדירנו תנועה ככזו העשויה להתחדש, צמצמנו עוד קצת את מעגל היצורים החיים המתאימים להגדרה זו.) "האמבה הכימית" תנוע, עד שכל הציקלו-הקסנול יתחמצן לציקלו-הקסנול ויתבטל ההפרש במתח הפנים בין שני החומרים. באופן דומה ינוע צעצוע, עד שתתרוקן הסוללה או שיתרפה הקפיץ וכו'. אף אחד מאלה לא יתחיל לנוע מחדש ללא התערבות האדם. במובן מסוים דומים כל המקרים האלה לאבן, המידרדרת במורד המדרון ונעצרת בהגיעה לתחתיתו. כל המערכות האלה נעות בזכות "מפל אנרגיה" כלשהו, ונעצרות בהגיען אל תחתית המפל למצב של שיווי-משקל. רק מערכות חיים יכולות לעצור את תנועתן ולהתחיל לנוע מחדש - בין השאר משום שאינן מערכות של שיווי-משקל, כפי שנבהיר בהמשך.

"אמבה כימית" - הוראות הכנה

זהירות - חומרים מסוכנים! להדגמה על-ידי המורה בלבד.

ציוד וחומרים

- צלחת פטרי
- שקף (להגנה)
- מטול
- טפי
- H_2SO_4 מרוכזת 98%
- $K_2Cr_2O_7$
- $CH_2(CH_2)_4CHOH$ ציקלו-הקסנול

הכנת תמיסת ביכרוםט (100 מ"ל):

ממיסים 2 גרם $K_2Cr_2O_7$ ב-90 מ"ל מים מזוקקים ומוסיפים להם 10 מ"ל H_2SO_4 .

מהלך הניסוי

1. הנח שקף על-גבי המטול. אל תדליק את המטול!
2. הצב את צלחת הפטרי במרכז השקף.
3. מזוג לצלחת הפטרי מתמיסת הביכרוםט כך שתכסה את כל התחתית.
4. טפטף טיפת ציקלו-הקסנול בטפי בינוני (לא דק) על פני התמיסה שבצלחת הפטרי והתבונן במתרחש.
5. הדלק במהירות את המטול.
6. אם ה"אמבה" לא נוצרת אחרי הטיפה הראשונה, יש להוסיף טיפות נוספות של ציקלו-הקסנול עד להיווצרותה בגודל הרצוי.
7. ה"אמבה" שולחת שלוחות לכל עבר ומזכירה תנועה של אמבה חיה.

הסבר:

מדובר בריאקציית חמצון, שבה הופך ציקלו-הקסנול (כוהל) לציקלו-הקסנול (קטון). בגלל ההבדל הרב במתח הפנים של התוצר לעומת המגיב, מתכווצת הטיפה במקומות שונים ומגיעה ליציבות רק לאחר סיום ריאקציית החמצון.

גירוי ותגובה

תגובה לגירוי נראית מאפיין הרבה יותר כללי וגם הכרחי, מאחר שכל היצורים החיים מגיבים לגירויים. הבעיה היא שקשה להגדירם במדויק, כי קיים מגוון רב של גירויים ומגוון לא פחות מרשים של תגובות. במקרים רבים יתקשה הרובוט (וגם החוקר) למצוא את הגירוי המתאים ולזהות את התגובה הרלוונטית. כך, למשל, אם נבדוק תגובה לסוג אחד של גירוי - הקרנה אלקטרו-מגנטית בתדר מסוים (אור) - נגלה שחלק מהיצורים ינועו לעבר מקור הקרינה, חלק יתרחקו ממנו, חלק אחר ישנה צבעו, חלק נוסף ימצמץ, וקבוצה גדולה של יצורים יתחילו בתהליך כימי מסובך, שבסופו נפלט גם חמצן. יתרה מזו, לכאורה אין מאפיין זה שייך רק ליצורים חיים, כלומר אינו מספיק. גביש נוזלי ישנה את צבעו כתגובה ללחץ, חומרים רבים (פלסטיים ואלסטיים) ישנו את צורתם כתגובה לאותו הגירוי, חומרים פוטוכרומיים ישנו את צבעם כתגובה להקרנה, וחומרים

אחרים יגיבו לגירוי זה בפליטת אור (זהירה, פלואורסצנסיה), מגוון עצום של חומרים יגיבו לשינוי טמפרטורה בשינוי מצב הצבירה שלהם, וכמובן - כל אותם ארטיפקטים מעשי ידי אדם, כמו חיישנים ומערכות אזעקה. כאמור, אפשר לחתור לצמצום האפשרויות באפיון מדויק יותר של המערכת גירוי-תגובה, כלומר של היחס בין משך הגירוי למשך התגובה (תופעת ה-habitation- התגובה לאותו גירוי הולכת ונחלשת עד להיעלמה המוחלט, אופיינית כנראה רק ליצורים חיים - אבל לא לכולם ולא לגבי כל גירוי); אך לא נראה לי שנגיע בדרך זו לתוצאה מספקת, כי ככל שנגיע להגדרה מדויקת יותר, נמצא עצמנו כוללים פחות ופחות יצורים חיים.

מבנה תאי

אחרי דיון בתנועה כמאפיין חיים עשוי מי מהתלמידים להציע, שהרובוט יבדוק אם הדגימה שימצא בנויה תאים. הדרך הקלה להתחמק מדיון במאפיין זה היא סירוב לצייד את הרובוט במיקרוסקופ הדרוש לזיהוי תאים. אך אם נוותר על תירוצ זה ניאלץ להודות שההצעה נשמעת טוב: כל היצורים החיים בנויים מתאים (חלקם רק מתא אחד), ודומה שאין לדברים שאינם חיים מבנה דומה. במעט מחשבה נוספת ניתקל בקושי להסביר לרובוט שלא התכוונו ל"תאים" המשושים של כוורת דבורים, אף לא למחרוזת פנינים ולגביש המורכב ממיקרו-גבישים (גבישונים) רבים. 3. התשובה הספונטנית לקושי זה היא הטענה שהתכוונו **לתא** חי, אך זו כמובן טאוטולוגיה (הסבר לא תקף של מושג בעזרת עצמו) נחמדה שרבים וטובים שוגים בה. עם זאת אולי ניתן לאפיין תא חי שלא באמצעות מושג החיים, וכך לצאת ממלכודת הטאוטולוגיה? נהוג להדגיש שתא חייב להיות עטוף קרום - ולא סתם קרום אלא קרום בררני (כמו הקרום העוטף את גבישי "הגן הכימי" או שקית דיאליזה), גם "פעיל" (היכול להעביר חומרים בניגוד למפל ריכוזים), גם גמיש - ואולי בעיקר קרום המסוגל לקלוט ולהעביר מידע כימי. בקיצור, צריך קרום **אמיתי** של תא חי.

ויש כאלה! במחקר ביו-רפואי מכינים לעתים צלליות (ghosts) פחותות את התא, מרוקנים אותו מן הגרעין והציטופלסמה שלו וסוגרים את הקרום מחדש. האם צללית כזו - קרום מלא מים - היא תא חי? ודאי שלא, שהרי תא חי כולל גם תוכנית גנטית מוצפנת. אם כך נוכל לכלוא בתוך הצללית גם חתיכות דנ"א או אפילו את כל הדנ"א של התא המקורי. האם הגדרנו עתה תא חי? דומה עדיין שלא, כי יש לכלול בצללית גם את המנגנון היודע לפענח את התוכנית המוצפנת ולהוציא אותה לפועל... בקיצור, דרוש כנראה תיאור מלא ומפורט של תא חי - אך תיאור זה אינו יכול להיחשב קריטריון או מאפיין. כדי לחדד את הבעיה הבה ונתעלם ממיקרו-גבישים וממחרוזות ושאר דוגמאות של פסאודו-תאים ונפנה לבעיה האמיתית, שעלתה לכותרות בשנים האחרונות (באדיבותה של סוכנות החלל האמריקאית: NASA) כיצד נוכל לקבוע שאותם עקבות שנמצאו במטאוריט שמקורו ממאדים הם אכן עקבות חיים (ראו תמונה משמאל)? מאחר שמדובר בצורת חיים מאוד פרימיטיבית (אם בכלל), הופנתה השאלה לחוקרים בענף המדעי שהתפתח מאז שנות העשרים של המאה ה-20: חקר התהוות החיים. חוקרים בענף זה הצליחו ליצור, בתנאים פרה-ביוטיים (prebiotic, כדוריות דמויות תאים (microspheres, coacervates). הכדוריות עטופות קרום, והחומרים שנלכדו בתוכן אפילו מבצעים סוג של חילוף חומרים פרימיטיבי. מדוע לא תיחשב כדורית כזו לתא חי? מתי בדיוק הופך "תא שבדרך" (protocell) לתא אמיתי? דומה שהקושי הזה לקושי שבהגדרת החיים עצמם, והטאוטולוגיה בעינה עומדת. מבחן המבנה התאי הותיר אותנו אפוא בתסכול לא פשוט: לכאורה הוא נראה מבחן מושלם: גם הכרחי וגם מספיק - אך הניסיון ליישם אותו רק גרם לחידוד הבעיה, ולא לפתרונה.

הרכב מולקולרי

ייתכן שתלמיד ידען במיוחד יציע, שהרובוט יבדוק אם הדוגמה שלו מורכבת מחלבונים או פולינוקליאטידים ו/או אולי גם רב-סוכרים ו/או פוספוליפידים וכו'. שוב נוכל להתחמק בטענה שהרובוט אינו מצויד במכשור לביצוע אנליזה כימית כזאת. אבל אם נבחר שלא להתחמק, נמצא את עצמנו בדיון דומה מאוד לזה שניהלנו בעניין המבנה התאי. לכאורה מדובר שוב במבחן מושלם: כל היצורים החיים מורכבים מחומרים כאלה, ואין דברים לא חיים בעלי הרכב דומה (למעט מוצרים ביו-טכנולוגיים מתוחכמים, המשתמשים במרכיבים מהחי, וכמובן יצורים מתיים). הקושי האמיתי מתעורר שוב בהקשר של התהוות החיים, כי מתברר שההרכב המסוים שהוזכר והמאפיין את כל היצורים החיים היום אינו מבחן מספיק (למיקרופירות שהזכרנו הרכב דומה, ואפשר לכלול בהן מרכיבים, הדומים יותר ויותר לאלה המצויים בחיים היום). כדאי להיכנס לדיון זה רק כדי להעלות אפשרות מעניינת: אולי החיים בפלנטה אחרת כלל לא מבוססים על אותם חומרים כימיים, ואולי אפילו לא על תרכובות פחמן, אלא צורן למשל (ראו מיקומו בטבלה המחזורית)? בהקשר זה ראוי להזכיר את טענתו של ג'ון קרן סמית (John Cairn Smith), לפיה גם החיים על-פני כדור-הארץ לא החלו מחלבונים ודנ"א. לטענתו של סמית, מנגנונים של דנ"א וחלבון הם יחסית "היי-טק", ואין זה סביר שהחיים הפרימיטיביים התחילו כך. סמית מציע אפוא שהחיים החלו בעצם כגבישי חרסית (תרכובת צורנית!), המגלים חלק מסימני החיים. במרוצת מיליוני השנים נספחו על גבישי החרסית חומצות אמינו ונוקליאטידים, ולאט-לאט יצרו את מנגנוני החיים של היום והכחידו את חיי החרסית בלי להותיר זכר. אבל בפלנטה אחרת...?

חילוף חומרים (מטבוליזם)

זהו לבטח מאפיין הכרחי של יצורים חיים. חוקרים רבים אף מעריכים שהוא אחד משני המאפיינים החשובים ביותר, ועם המאפיין השני - רבייה - הוא גם מהווה תנאי מספיק. להפנמה או קליטה של חומרים מסוימים ופליטה של חומרים אחרים תוך כדי ניצול

האנרגיה המשתחררת בפירוק החומרים הנכנסים" נראית לי הגדרה סבירה, שגם הרובוט שלנו יוכל להסתדר אתה. כדאי לשים לב: הגדרה כזו כוללת גם נשימה, ולכן אין כל צורך לדון במאפיין זה בנפרד.

רואים מיד שהגדרה כזו אינה מהווה תנאי מספיק, משום שכל מנוע שריפה וגם שורה של ארטיפקטים אחרים מבצעים "חילוף חומרים". בעולם הדומם שאינו כולל ארטיפקטים קשה יותר למצוא דוגמאות של מטבוליזם. אפשר לנסות ולמתוח את ההגדרה כדי להתאימה לתופעות געשיות - אם נתעלם מהפרט הפעוט שהר-געש (וגם גייזר) הוא אורגניזם גדול-ממדים מאוד. הועלתה גם הטענה, שאם נמיר את פליטת החומר בפליטת אנרגיה, הרי גם גידול גביש הוא מעין תהליך מטבולי (אם מטילים גרעין גיבוש לתמיסה על-רוויה, אכן נפלטת כמות גדולה של חום). ראוי גם לציין, שמטבוליזם מבדיל באופן מוחלט בין חי למת.

לדעתי, מעניין, יהיה להתמודד עם הגדרה מעט שונה של מטבוליזם - זו שהוצעה על-ידי ג'ון מינרד סמית (John Maynard Smith) בספרו

The problems of biology: "מטבוליזם הוא התהליך, המאפשר ליצור החי לשמור על מבנה (צורה) קבוע תוך החלפה מתמדת של מרכיביו". הגדרה זו מדגישה שיצור חי זקוק לחילוף חומרים לא רק לשם צמיחה, תנועה או פעילות כלשהי - אלא לעצם קיומו. מינרד סמית מזכיר שתי תופעות מעולם הדומם, המתאימות גם הן להגדרה זו של מטבוליזם: מערבולת מים (vortex) ואלהבה. אין זה סתם צירוף מקרים, שכן למערבולת, ללהבה וליצורים חיים יש תכונה משותפת: מבחינה תרמודינמית הם רחוקים משיווי-משקל, והם מבנים דיסיפטיביים (dissipative Structures). להמחיש את ההבדל ביניהם לבין מבנים של שיווי-משקל היא זו: מבנה של שיווי-משקל (בניין, גביש, שולחן...) ייהרס אם יקלוט כמות גדולה של אנרגיה; אך מבנה דיסיפטיבי זקוק לזרימת אנרגיה מתמדת לקיומו, והוא ייהרס אם קליטת האנרגיה תיפסק!



צורות זעירות, שהתגלו במטאוריט ממאדים בסיוע מיקרוסקופ אלקטרוני (SEM). מבנים "ביולוגיים" אלה מזכירים חידקים זעירים מאובנים (מקור: NASA).

רבייה

רבייה נחשבת לאחד המאפיינים העיקריים של יצורים חיים, אולם נקודה זו אינה מובנת מאליה. ראשית, ילד יחיד לזוג הורים יוכל לשאול: מדוע התהליך, שבו מעמידים שני יצורים בוגרים צאצא אחד, מכונה "רבייה", ולא צמצום? שאלה זו נוגעת גם למינים אחרים, אולם היא סמנטית-תרגומית בעיקרה. התרגום המילולי של רבייה הוא multiplication, המונח הנכון היה אמור להיות reproduction או propagation. שנית, רובוט המונחת על פלנטה רחוקה יתקשה להבחין שבמינים בעלי הפריה פנימית מולידים הזכרים יצורים חדשים (אלא אם כן יוסבר לו התהליך לפרטיו).

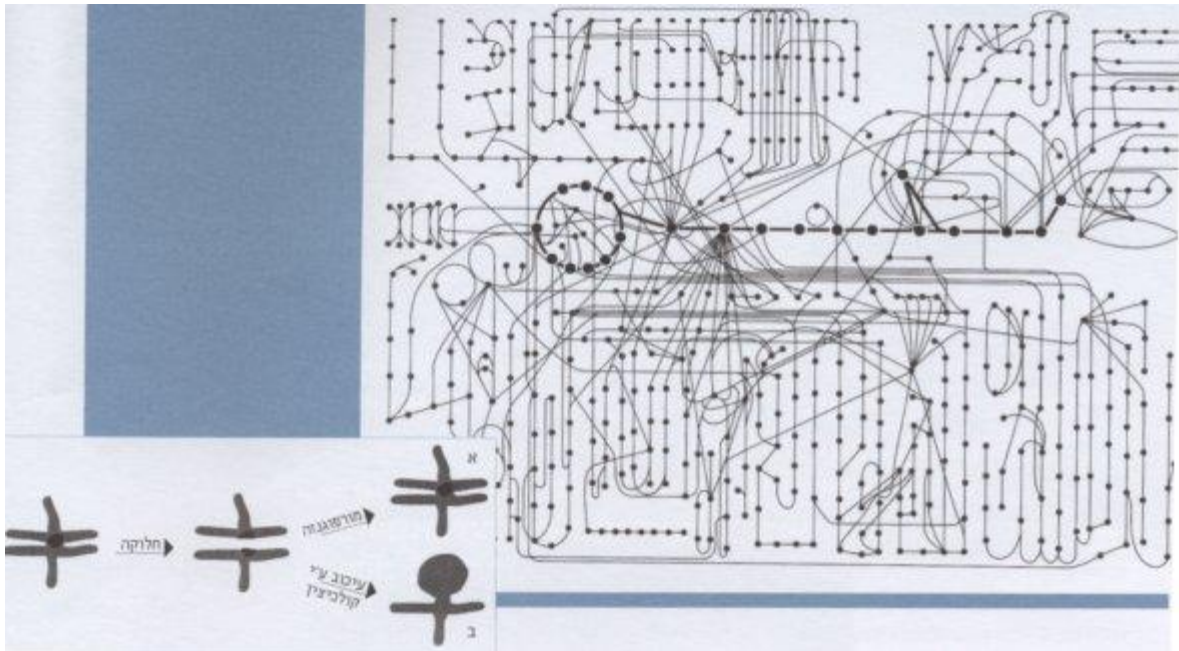
שלישית, יצורים חיים מסוימים אכן אינם מתרבים: באדם וביונקים אחרים יש לא מעט מקרים של עקרות (כמו גם הימנעות אידיאולוגית ממצוות "פרו ורבו" - אצל נזירים, למשל). בלהקות של בעלי-חיים רבים קיים זכר דומיננטי המפרה את כל נקבות הלהקה - בעוד שזכרים האחרים אינם "זוכים" כלל להזדווג. בחרקים חברתיים מתרבות רק המלכות - ואילו "המוני הפועלות" עקרות. ולבסוף יש להזכיר, כמובן, את הפרד, המהווה ממש "תאונה" של האבולוציה... למרות כל היוצאים מן הכלל אלה, רבייה היא מבחן תקף בהחלט - אבל יש לשנות מעט את משימת הרובוט: במקום לשאול "האם יצור כלשהו מתרבה או מעמיד צאצאים?" - יהיה עליו לבחון את מוצאו של היצור. אם יגלה שמוצאו מיצור אחר הדומה לו - הרי יגלה מבחן המאפיין את כל היצורים החיים (מלבד היצור הראשון!).

כמו רבים אחרים מתעלם מונו מהקשיים שצינו ומתייחס לרבייה כתנאי הכרחי - אם כי לא מספיק. אכן קיימים לפחות עוד שני דברים בעלי יכולת להתרבות: גביש; ורובוט שתוכנת לבנות רובוטים נוספים זהים לעצמו. רבייה של גביש אינה תהליך מובן מאליה. ניתן להדגימה ב"זריעה 1" של תמיסה על-רוויה (של סודיום אצטאט, למשל), אולם קשה לטעון שתהליך כזה עשוי להתרחש גם בטבע ללא התערבות האדם. יש לאמץ את הדמיון כדי להמציא תסריט סביר, וכך, למשל, לדמיון כמה שלוליות של מים מלוחים שנוצרו על חוף הים. באחת מהן התנדפו המים מהר יותר מאשר באחרות, והחלו להיווצר בה גבישים. בינתיים הגיע המצב בשלוליות האחרות לרוויה או על-רוויה. אם במקרה זה יובא גבישון קטן מהשלולית הראשונה אל אחת השלוליות האחרות (על-ידי רוח או בעל-חיים כלשהו) הוא עשוי לשמש גרעין גיבוש לגבישים חדשים. מונו מסכם את הדיון במאפיין הרבייה, בו בחר כמאפיין ראשון בצורה כזו:

רבייה: יצור חי, גביש, רובוט

ברור, אם כן, שדרושים מאפיינים נוספים כדי להוציא את הגביש ואת הרובוט מהמדגם.

ייצוג של כ-500 תהליכים מטבוליים עיקריים, המתרחשים בתא חי.
 כל נקודה מייצגת מולקולה, וכל קו המחבר בין שתי נקודות מייצג תגובה.
 מקור: (1994) Alberts, B., Bray, D., Lewis, J., Raff, M., Roberts, K., Watson, J.
 The molecular biology of the cell, Garland Publishing Inc. 3-d edition (p.83)



עיכוב מורפוגנזה של אצה ממשפחת הדסמידיים בעזרת קולכיצין

מורפוגנזה עצמית (autonomous morphogenesis)

המאפיין השני שמציע מונו הוא מורפוגנזה עצמית. נתוודע למאפיין זה דרך דיון ברבייה של "אמבה כימית". לפעמים מתבקעת טיפת ציקלו-הקסנול (ציקלו-הקסנול) גדולה לשניים תוך כדי תנועה. שתי הטיפות הקטנות יותר עשויות להתבקע אף הן, וכן הלאה. במה שונה תהליך זה מרבייה של אמבה אמיתית או יצור חי אחר?

ברור ש"רבייה" כזו של "אמבה כימית" אינה מסתכמת ביצירת "צאצאים" דומים להוריהם, אלא צאצאים ההולכים וקטנים מדור לדור. חסר פה אפוא תהליך של גידול (צמיחה). מונו מעיר כאן, שבדרך כלל אין יצורים חיים גדלים סתם, אלא תוך כדי בניית צורה, כלומר בתהליך המכונה "מורפוגנזה" (morphogenesis). מורפוגנזה של יצור חי אוטונומית, משום שהצורה נקבעת על-ידי תוכנית פנימית של האורגניזם ונבנית בעזרת כוחות פנימיים.

דוגמה מוכרת לנו היטב היא המורפוגנזה של יונקים כמונו, שבהם נוצר יצור בעל ארבע גפיים, ראש, עיניים, אוזניים וכו' מבלסטומר עגול של 32 תאים.

דוגמה אחרת, יפה במיוחד, לקוחה דווקא מעולם היצורים החד-תאיים. אצות ממשפחת הדסמידים בנויות משני חצאי תאים זהים (hemicells) בחלוקה נפרד התא לשני החצאים שלו וכל אחד משחזר בתהליך מורפוגנטי את החצי השני; אך כאשר מעכבים את המורפוגנזה על-ידי הוספת קולכיצין (colchicine) מתקבלת צמיחה ללא בניית צורה (ראו ציור מימין). (קולכיצין מעכב פלמור של מיקרוטובולי - קבוצה של חלבונים שלדיים האחראים למורפוגנזה ביצור זה ובאחרים).

מאפיין זה אינו מתאים לרובוט מתרבה, אף שהרובוט בהחלט בונה צורה, ואפילו מורכבת למדי. המורפוגנזה של רובוט אינה אוטונומית, מכיוון ש"צאצאיו" אינם מתפתחים מעצמם, אלא מורכבים על-ידי הרובוט ה"הורה" מחלקים לקוחים ממדף. גביש, לעומת זאת, בהחלט "צומח" על-ידי כוחות פנימיים. אם הגדרנו רבייה כ"משהו (אחד או רבים) אחר הדומה לו", עלול להיות קושי בהבנת הרבייה של גביש. צורתו החיצונית של גביש נקבעת על-ידי צורת הכלי בו הוא גדל, ואין שום סיבה שיהיה דמיון חיצוני בין "גביש אב" ל"גביש בת".

הצורה המורפוגנטית של הגביש מתגלה רק בסימטריה המולקולרית או האטומית של תא היחידה שלו. כדי להתוודע למאפיין זה ניאלץ לצייד את הרובוט במכשיר לאנליזה של שבירת קרני X, אבל החלטנו כבר שלא נגביל אותו במכשור מתוחכם. דוגמה מפורסמת אחרת של מורפוגנזה כימית היא "גן כימי" - "צמיחת" גבישונים של מלחי מתכות כבדות ב"מי-זכוכית" (ראו הערה 1). בסכמנו את שני המאפיינים שמציע ז'ק מונו נקבל:

רבייה: יצור חי, גביש, רובוט.

מורפוגנזה עצמית: יצור חי, גביש, רובוט.

כדי להבדיל בין גביש ליצור חי דרוש אפוא מאפיין נוסף. מונו מציע מאפיין שלישי.

צורה טלאונומית

צורה טלאונומית, פירושה צורה המשרתת תכלית, כלומר: צורה המותאמת לתפקיד. יש להקפיד כאן בעניינים סמנטיים, כדי לא ליפול למלכודות למרקסיסטיות 6 ואחרות. "תכלית" רומזת לכוונה - אבל הביולוגיה הרי אינה מייחסת כוונות ליצורים חיים. 7 כידוע, נוצרת שונות באקראי (מוטציות, שכפול לא מדויק וכו'), ובין הצאצאים השונים נברר המותאם טוב יותר לתנאי סביבתו. במילים אחרות: אין לשאול: "לשם מה 'פיתחה' הג'ירפה את הצוואר הארוך שלה?" - אך ניתן בהחלט לשאול: "למה משמש הצוואר הארוך של הג'ירפה?" או "למה הוא מותאם?". וכך לגבי כמעט כל איבר ואיבר ביצורים חיים. 8 על-פי הגדרתה כאן מאפיינת טלאונומיה, כמובן, גם את מידענו הרבובט ואת כל שאר הארטיפקטים; אולם לגביש אין צורה טלאונומית, כי אין שום דרך הגיונית שבה אפשר ליחס לגביש או לחלקיו תפקיד כלשהו.

נוכל אפוא לסכם על-פי ז'ק מונו: צירוף שלוש המאפיינים מהווה אפיון הכרחי ומספיק של יצורים חיים:

רבייה: יצור חי, גביש, רבובט.

מורפוגנזה עצמית: יצור חי, גביש, רבובט.

צורה טלאונומית: יצור חי, רבובט, גביש.

לסיכום הנושא אבהיר שתי סוגיות הקשורות לשאלה שהעסיקה אותנו: האחת - מדעית ופילוסופית; השנייה - דידקטית.

א. דו-שיח בין ביולוג לכימאי בחלק גדול מהצגת השאלה "מה הם חיים?" הסתתר דו-שיח בין ביולוג לכימאי. הראשון טען לייחודיות תופעות החי, ועמיתו השיב: "מה שאתה (כלומר היצורים החיים) יודע לעשות - אוכל גם אני לשחזר במעבדה": 9 תנועה עצמית - אמבה כימית; תגובה לגירוי - גביש נוזלי, חומר פוטו-כרומי וכו'; רבייה - גידול גבישים; מורפוגנזה - שוב גביש או "גן כימי" וכו'.

מבחינה פילוסופית נוקט הכימאי בעמדה רדוקציוניסטית (reductionism), שבגרסתה החזקה טוענת: כל תהליכי החיים אינם אלא תהליכים כימיים ופיסיקליים. לעומתו יואשם הביולוג בוויטליזם (vitalism), יטען שבתופעת החיים מתגלים כוחות חיות חדשים, שאין להם הסבר כימי-פיסיקלי (מה שכוונה במאה ה-19 (elan vital) כדי להראות היכן בערך נמצא ויכות זה בימינו, אוסיף סיכוב: הביולוג יטען: כל התהליכים הפיסיקו-כימיים המוכרים שואפים לשיווי-משקל תרמודינמי (מצב של אנטרופיה מקסימלית, וליתר דיוק - אנרגיה חופשית מינימלית). לעומת זאת מתנהלת הכימיה של החיים רחוק משיווי-משקל ושואפת אליו רק אחרי מותו של היצור החי. 10 לחיזוק טענתו יוכל הביולוג להדגים את "ריאקציית הזיקית" (ראו משמאל) כדוגמה יפה במיוחד של מערכת כימית השואפת לשיווי-משקל.

לעומתו יזכיר הכימאי שאחד הביטויים להעדר שיווי-משקל בחי הוא תופעות מחזוריות (biorhythms) עירנות ושינה, סגירה ופתיחה של עלי כותרת בפרחים, פעימות לב, פעימות ריסים, מחזוריות של פעילות ושנת חורף, מחזורים הורמונליים וכו', וידגים גם הוא ריאקציה מחזורית שאינה מגיעה לשיווי-משקל. 11, 1

הביולוג עדיין לא צריך להתייאש לנוכח הריאקציה המחזורית היפה; הוא יכול לבקש מהכימאי שיראה לו את מערכות התגובות הכימיות שהולידו את התופעה המחזורית - אם אכן הצליח לפענח. הכימאי יציג בגאווה מערכת של כ-18 שלבים, וכל מי שלמד קצת כימיה אורגנית יודע שזו מערכת מאוד מורכבת... כאן יוכל הביולוג להעלות חיוך של סיפוק ולהציג את מערכת הריאקציות המתרחשות בתא חי...

מה מלמד כל זה על הוויכוח הפילוסופי? היום אין כמעט ויטליסטים במובן הקלסי, כלומר כאלה המאמינים שבתופעות החיים פועל עיקרון כלשהו, הסותר את חוקי הכימיה והפיסיקה. טענתם היא שאולי יש עיקרון חדש וייחודי, שאינו סותר חוקי פיסיקה וכימיה. חלק מהטענות הללו מתמקד במורכבות הבלתי-רגילה של יצורים חיים, ולו גם הפשוטים ביותר.

חקר המערכות המורכבות הוא תחום חדש יחסית. מוקדם לשפוט אם תצאנה ממנו תובנות מעמיקות בשאלת ייחודם של החיים. בימינו לא יצפה רדוקציוניסט אדוק כלל לתכונות נוספות. לגבי דידו פוענחו עקרונות - אם כי לא בפרטים - כל סודות החיים. שאלת המבחן, המפרידה בין ההשקפות, היא אולי התרסה מהסוג: "אם הכול כל-כך מובן, כיצד זה לא הצלחנו להרכיב יצור חי - ולו גם התא הפרימיטיבי ביותר?" קרוב לוודאי רדוקציוניסט ישיב שזו בעיקר בעיה טכנית, כלומר פרטים רבים מאוד צריכים להילקח בחשבון, ואכן לא כולם ידועים; הספקן יאמין שבכל זאת קיימת האפשרות שיתגלו עוד עקרונות חדשים; אך אף אחד מהם לא חושב שעקרונות כאלה, אם יתגלו, יסותרו את חוקי הפיסיקה והכימיה. 12

ב. היבט דידקטי

במאמרנו זה ניסינו לתאר "דיון חי", כפי שהוא עשוי להתנהל בכיתה. ייתכנו, כמובן, טיעונים נוספים או דגשים אחרים. כך, למשל, לא הודגש בדיון מאפיין מכריע נוסף - תוכנית (גנטית) מוצפנת המועתקת מדור לדור (עם שגיאות). הגנטיקה היתה מובלעת בדיון על רבייה, מורפוגנזה וטלאונומיה. אפשר היה לחתור להגדרה: "יצור חי הוא מערכת פתוחה מבחינה תרמודינמית, שבה מתרחשות ריאקציות כימיות מסודרות המאפשרות שינויים אוטונומיים ופילוגנטיים".

פרשנות קצרה: מערכת פירושה שיצור חי צריך להיות תחום על-ידי קרום, עור וכו'. פתוחה מבחינה תרמודינמית פירושה ש"מעטפת" זו צריכה לאפשר החלפת חומרים ואנרגיה עם הסביבה. ריאקציות כימיות מסודרות רומזות לביטוי של תוכנית גנטית

הכוללת בקורות ולהיות המערכת רחוקה משווי-משקל. **אונטוגנזה** היא התפתחות היצור (גדילה, מורפוגנזה, מטמורפוזת וכו'). ואילו **פילוגנזה** היא השתנות אבולוציונית, הדורשת כאמור שכפול בלתי-מדויק ומאבק הישרדות... הגדרה זו מספקת יותר מבחינה מדעית, אבל קשה להבנה לתלמידי חטיבת-הביניים. גם לא נגענו כלל בשאלה המרתקת: "האם ייתכנו בפלנטה אחרת חיי-נצח - או שמא כלול המוות בהגדרת החיים?" לא הזכרנו עוד היבטים רבים, משום שעסקנו ב"שאלה פתוחה" באופן עקרוני. רק חוקרים מעטים מייחסים חשיבות לשאלת הגדרת החיים. הם אינם זקוקים להגדרה כזאת למחקריהם, ואילו לא היתה מתפרסמת מדי פעם טענה לגבי חיים בחלל החיצון, ייתכן שהשאלה כלל לא היתה עולה לתודעת הציבור; ודאי שאין לצפות מבירור בשאלה הזאת לתוצאות מעשיות, אולם לתלמידנו אפשר - וחשוב - להדגים התמודדות עם שאלה פתוחה, שלא רק למורה, אלא גם ל"חכמי הדור", אין עליה תשובה מוחלטת וסופית. שאלה כזאת נשאלת לשם סיפוק הסקרנות. התמודדות עם שאלה כזו עשויה להניב לא רק דיון מעניין, אלא גם להעביר משהו מאווירת המחקר המדעי, המתמודד תמיד עם שאלות פתוחות.

לקריאה נוספת:

< ינאי צבי, בעקבות המחשבות, הוצאת טובי סופר, 1994.
< ליפסון שניאור, אחדות הטבע והיקום, מחשבות בעל-פה, נובמבר 1988.

• **גן כימי** - ערכות ניסוי, סיינט דמו מע"מ, 1-800-676769