



מותר החי מן הדומם: מוצא הבררה הטבעית

שניאור ליפסון

שני צדדים לבעיית מוצא החיים: מצד אחד, הביולוגיה המולקולרית מסבירה את תהליכי החיים בשפת הפיזיקה והכימיה ומתארת בפרוטרוט את מורכבותם ואת אופיים התכליתי שאין דומה לו בעולם הדומם, אך אין היא עונה על השאלות הנוגעות למוצאם של התהליכים האלה: כיצד נוצרה המורכבות? מה מקור התכליתיות (Teleonomy) והארגון התכליתי? מצד אחר, תורת האבולוציה מסבירה שתולדות החי למינהו, כלומר התפתחות תהליכי החיים למן התא הקדום ועד לביוספרה של ימינו, הן תוצאה של בררה טבעית, אך גם היא אינה עונה על שאלות המוצא: כיצד נוצר התא הקדום ומתי הופיעה הבררה הטבעית?

שכפול הוא שם כולל לכל תהליך היוצר עותקים שווים או דומים למקור בין אם הוא תהליך כימי פשוט כגון אוטוקטליזה, ובין אם הוא תהליך מרכב כגון שכפול DNA, התחלקות תאים או רבייה.

בררה טבעית בין יצורים חיים פירושה היכחדות המתאימים פחות והישרדות המתאימים יותר והיא מחייבת רבייה והיווצרות מוטנטים המתחרים זה בזה על מקורות מזון ועל תנאי מחיה. הטבלה למדת שהתנאים הדרושים לבררה טבעית אכן מתקיימים בשכפלים כימיים כמו ביצורים חיים.

ראשית, שכפל ראשון ומוטנט ראשון היו צריכים להיווצר באקראי אי-שם אי-פעם, שאם לא כן לא הייתה יכולה להתהוות בררה טבעית. הם היו צריכים להיות פשוטים לאין ערוך מהשכפל נושא הצופן הגנטי, שהוא עיקרו של התא הקדום, שאם לא כן לא היה להם סיכוי להיווצר באקראי. זהותם של השכפלים הראשונים אינה ידועה עדיין, אולם אפשר לחפש אחריהם בדרך הניסוי והתצפית, כשם שאסטרונומים חיפשו חורים שחורים מרגע שהתאוריה ניבאה את סבירות קיומם.

שנית, מרגע שנוצר שכפל כלשהו הוא יכול להשתכפל כשם שיצור יכול להתרבות. כמו יצור חי שכפל משתכפל בקצב גדל והולך, אולם גם חומרי המוצא שלו כלים בקצב גדל והולך. לפיכך ריכוזו של שכפל חייב להתייצב, מאחר שכפי שאפשר להוכיח קצב האספקה של חומרי המוצא, קצב השכפול וקצב ההתפרקות מתאזנים במהלך השכפול.

השאלות הללו אחוזות ודבוקות כולן זו בזו וכך גם התשובות: בררה טבעית קדמה לחיים, כלומר ראשיתה בחומר דומם; בררה טבעית היא אשר יצרה הן את ראשית החומר החי מחומר דומם הן את האבולוציה כולה, מראשית החומר החי, דרך התא הקדום ועד לביוספרה הנוכחית. לפיכך הבררה הטבעית היא מקור התכליתיות, המורכבות והארגון התכליתי שבהם טמון מותר החי מן הדומם.

השלב הראשון בהוכחת האמור לעיל מחייב הרחבה של המושג "בררה טבעית" כדי לעשותו ישים גם לתהליכים בחומר דומם. לשם כך אשתמש במושגים תואמים מתחומי הכימיה והביולוגיה:

בכימיה	בביולוגיה
אוטוקטליזה, שכפול (replication)	רבייה (reproduction)
שכפל (replicator)	יצור חי
שינוי כימי בשכפל	מוטציה
שכפלים שחל שינוי בהרכבם	מוטנטים
התפרקות (של שכפל בודד)	מוות (של יצור חי)
	היכחדות (של המין כולו) היעלמות (של כל השכפלים הזהים בהרכבם)
חומרי מוצא	מזון
תוצרי לוואי	פסולת



איזון כזה מחייב מנגנוני ויסות העושים את המערכת למאורגנת, ולמערכת כזו יש עדיפות ברה גדולה יותר ככל שהמערכת מאורגנת טוב יותר ממתחריה.

השלב השלישי הוא הדרך בת אלף המילין שעברו השכפלים מראשית התהוות הבררה הטבעית, המורכבות והארגון התכליתי ועד התא הקדום, שהוא אביה הקדמון של הביוספרה של ימינו. בדרך זו הופיעו בלי הרף שכפלים חדשים, מקצתם מורכבים יותר, תכליתיים יותר ומאורגנים יותר מקודמיהם. הם שרדו כל עוד קצב השכפול-נטו שלהם היה חיובי, ונכחדו לבלי שוב כאשר קצב השכפול-נטו שלהם נעשה שלילי. כתחנות לאורך דרך זו הופיעו ונכחדו מערכות שכפול בעלות תכונות שאת רובן ודאי לא נדע לעולם, אך את מקצתן אפשר לשער במידה זו או אחרת של מהימנות לפי העקבות שהשאירו במהלך הדורות ומתוך כל הידוע לנו מן הביולוגיה המולקולרית. אציין כמה מן התחנות כהשערות סבירות הנובעות מן השיקולים דלעיל.

◆ האמונה הרווחת כיום שלפיה השכפל הראשוני היה פולימר דמוי RNA היא בלתי סבירה לדעתי ואינה מתיישבת עם תיאורי על התהוות הבררה הטבעית. ואולם, בהמשך הדרך נוצרו פולימרים המשתכפלים בשיעוֹק (template replication), לכן ייתכן ששלב ביניים בדרך לשיעוֹק היה התחברות שכפלים ראשוניים לדימרים ואוליגומרים. לשלב זה יכולה להיות עדיפות ברה גדולה בגלל שפע האפשרויות של היווצרות מוטנטים פולימריים מתוך מספר קטן של מוטנטים מונומריים. ברה טבעית בין המוטנטים האלה הולכה בסופו של דבר בדרך ארוכה ונפתלת שפרטיה נעלמים עדיין להתהוות צופן גנטי ולמנגנונים המפענחים ומיישמים את האינפורמציה המוצפנת.

◆ סביר להניח כי אחת התחנות הראשונות בדרך לתא הראשוני הייתה הופעת השכפל הכירלי הראשון (מולקולות הן כירליות אם אינן זהות לתמונת הראי שלהן, בדומה ליד ימין ויד שמאל). כירליות טהורה (pure chirality) היתה בלא ספק בעלת עדיפות ברה גדולה, שהרי נעשתה בהמשך האבולוציה תכונה אוניברסלית של כל חומצות הגרעין, החלבונים והסוכרים.

◆ סביר להניח כי בדרך להיווצרות תאים הופיעו בין תוצרי הלוואי של השכפלים מולקולות שומניות או שומניות למחצה (אמפיפיליות) המתאימות ליצירת קרומים (ממברנות). שכפלים המוקפים בקרומים עבירים לחומרי מוצא ולחומרי פסולת הם בעלי עדיפות ברה מובהקת, וככל שעבירות זו סלקטיבית יותר כן גדלה עדיפות הבררה.

שלישית, בתהליך השכפול יכולים להיווצר באקראי שכפלים חדשים עקב שינוי כימי בשכפלים קיימים בדומה למוטציות ביצורים חיים. אם השכפלים הישנים והחדשים תלויים באותם חומרי מוצא, בהכרח נוצרת ביניהם תחרות.

רביעית, שכפלים השונים זה מזה בקצב שכפולם או בקצב התפרקותם אינם יכולים להתקיים יחדיו לאורך ימים, אם הם מתחרים זה בזה. אלו שקצב התפרקותם גדול מקצב שכפולם הולכים ופוחתים עד שהם נכחדים, ואילו האחרים שורדים. תהליכי היכחדות מול תהליכי הישרדות מהווים יחדיו ברה טבעית. משמע, ברה טבעית פועלת על שכפלים כימיים כמו על יצורים חיים.

בשלב השני אנו למדים כי הבררה הטבעית יוצרת תהליך של היזון חוזר, שבו הסביבה והשכפלים משנים זה את זה בלא הרף. תהליך זה הוא מקורם של התכליתיות, המורכבות והארגון התכליתי, שבהם מותר החי מן הדומם.

התכליתיות מקורה שהבררה הטבעית מכחיחה תמיד את השכפלים בעלי שכפול-נטו שלילי, כלומר אלה שקצב התפרקותם גדול מקצב שכפולם, ולכן ממילא נראים הנשארים בעלי תכונות מועילות שכאלו נוצרו לתכלית ההישרדות. הבררה הטבעית לעולם אינה צופה מראש את התכונות התכליתיות של מוטנטים חדשים, שכן יצירת מוטנטים היא תהליך אקראי. תכליתיותם של מוטנטים ששרדו בברה הטבעית היא תוצאה בדיעבד של היכחדות מתחריהם, שהיא תהליך דטרמיניסטי. מן הראוי להדגיש עניין זה, שהוא מקור לטעויות ולמבוכה מאז הופעת מוצא המינים של דרווין ועד היום.

המורכבות מקורה שבתהליך השכפול נעלמים חומרי המוצא הישנים ומצטברות תרכובות חדשות, תולדות (Sequels) של תוצרי הלוואי, מחמת קרינת השמש ומקורות אנרגיה אחרים. שכפלים המשתמשים בתולדות של תוצרי הלוואי כחומרי מוצא הם מערכת שכפול מורכבת השורדת בכל מקרה שיש לה עדיפות ברה (Selective advantage).

אחד מגילוייה החשובים ביותר של המורכבות היא הקואופרציה בין שכפלים. שכפלים עשויים להקנות זה לזה עדיפות ברה בכמה דרכים, לדוגמה כאשר התרכובות החדשות הנגזרות מתוצרי הלוואי של אחד מהם משמשות חומרי מוצא או זרזים או וסתים של תהליכי השכפול של זולתו. אם הקואופרציה בין שכפלים גוברת על התחרות ביניהם, הם שורדים יחדיו או כלים יחדיו והופכים להיות יחידת שכפול אחת.

הארגון התכליתי מקורו שמערכת מורכבת יכולה להשתכפל כיחידה רק אם יש איזון ותיאום בין התהליכים המרכיבים אותה.

הרעיונות שהעליתי כאן מאירים באור חדש סוגיות רבות במרכז הוויכוחים שבין טובי החוקרים בתחום חקר מוצא החיים ובתחום חקר האבולוציה והדינמיקה של אוכלוסיות, משום שרעיונות אלה מאחדים את שני התחומים הללו. איחוד זה מתמצה בטענתי כי הבררה הטבעית היא אשר יצרה הן את ראשית החומר החי מחומר דומם הן את האבולוציה כולה מראשית החומר החי, דרך התא הקדום, ועד לביוספרה הנוכחית.