

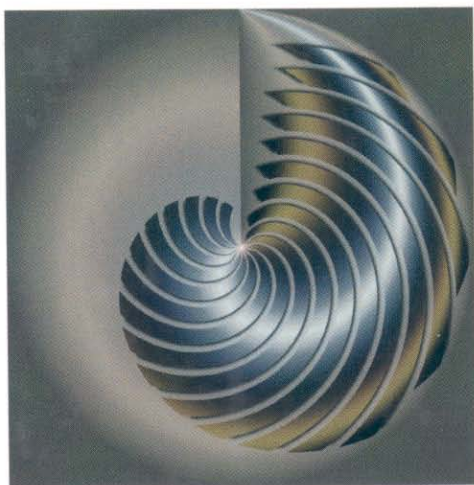
הלוגיקה

של

החזי

היסטוריה

של התורשה



פרנסוואה ז'אקוב



פרנסוואה ז'אקוב
הלוגיקה של החי

*Ouvrage publié avec le soutien du
Ministère Français chargé de la Culture*

פרנסואה ז'אקוב

הלוגיקה של החי

היסטוריה של התורשה



מוסד שמואל נאמן
למחקר מתקדם במדע ובטכנולוגיה



כתר הוצאה לאור

François Jacob, La logique du vivant
Gallimard, Paris, 1970
The Logic of Life
Pantheon, New York, 1973

מאנגלית: אורי כץ
עריכה לשונית: נילי לנדסברגר
עריכה מדעית: אורי כץ, הטכניון, מכון טכנולוגי לישראל

Copyright © by The S. Neaman Institute
and Keter Publishing House Ltd.
P.O.B. 7145, Jerusalem Israel

© כל הזכויות שמורות, 1993
למוסד שמואל נאמן, הטכניון, חיפה
ולכתר הוצאה לאור בע"מ
ת.ד. 7145, ירושלים

אין להעתיק, לשכפל, לצלם, להקליט, לתרגם,
לאחסן במאגר מידע או להפיץ ספר זה
או קטעים ממנו בשום צורה ובשום אמצעי,
אלקטרוני, אופטי או מיכאני (לרבות צילום
והקלטה), ללא אישור בכתב מהמוציא לאור

מספר קטלוגי: 538310
מסת"ב: 965-07-0420-5 ISBN

סידור, הדפסה וכריכה: מפעלי דפוס כתר, ירושלים
Printed in Israel

רואה אתה ביצית זוז בעזרתה תוכל
להפיל מעל כן אסכולות תיאולוגיות
את כל הכנסיות על־פני האדמה.
דידרו, שיחה עם ד'אלמבר

תוכן העניינים

- הקדמת המחבר למהדורה העברית 9
הערות העורך 13

מבוא

התוכנה 17

המבנה הנראה 35

גנרציה 36

פענוח הטבע 44

מנגנון 49

מין (*species*) 60

היווצרות מוקדמת 69

תורשה 84

ארגון 93

זיכרון ותורשה 94

הארכיטקטורה התבויה 102

חיים 108

הכימיה של החיים 112

תוכנית הארגון 120

התא 131

זמן 151

שואות 152

טרנספורמציות 164

מאובנים 174

אבולוציה 182

הגן 201

עריכת ניסויים 203

ניתוח סטטיסטי 215

הולדת הגנטיקה 225

דיקוד הכרומוזומים 232

אנזימים 250

המולקולה 271

מקרומוולקולות 273

מיקרואורגניזמים 284

המסר 291

ויסות ובקרה 303

העתק ושגיאה 311

סיכום

האינטגרון 325

הערות 351

בין התפתחות לאבולוציה – ישעיהו ליבוביץ 365

נספח – פרטים ביוגרפיים 381

מפתח 407

פתח דבר

במוסד נאמן, העוסק במחקרי מדיניות, מדע וטכנולוגיה, הוחלט לפעול להגברת העניין ולהרחבת הידע של בני נוער ומבוגרים במדעי הטבע ובמדעי ההנדסה. אחת הדרכים להשגת מטרה זו היא תרגום סדרה של ספרי מופת בתחומי מדע וטכנולוגיה.

כספר ראשון בסדרה זו בחרנו בספרו של חתן פרס נובל, הגנטיקאי פרנסואה ז'אקוב. בספר מוצגת בצורה שיטתית, יסודית ובהירה התפתחות הרעיונות בתחום התורשה מן המאה ה-17 עד המאה ה-20. ספר זה מאגד רעיונות חשובים ומרכזיים לביולוגיה המודרנית ומביא אותם ברבדים שלובים בצורה המאפשרת לחובב 'נבון' וגם לאיש המקצוע ליהנות וללמוד.

אנו מקווים שהקריאה והעיון בספר זה יעוררו בקורא אותה הרגשה של סיפוק והנאה שחשו כל המעורבים בתרגומו ובהוצאתו לאור.

פרופ' דניאל ויס

מנהל מוסד שמואל נאמן

למחקר מתקדם במדע ובטכנולוגיה

הקדמה

מאז לידתו של המדע המודרני במאה ה-17 השקיע העולם המערבי מאמץ מרוכז ובלתי־נלאה בחקירתו של עולם־החי. מאמץ זה אינו נובע רק מסקרנותו של האדם הניצב לנוכח הטבע. הוא נובע גם מצרכים חברתיים, הקשורים בעיקר ברפואה ובחקלאות. במאה האחרונה, מדעי החיים שינו באורח קיצוני לא רק את הדרך שבה האדם מסתכל בטבעו שלו, במוצאו וביחסיו עם יצורים אחרים. הם גם שינו את יחסו כלפי גופו, את תגובתו למחלות, ואת הדרך שהוא משתמש ביצורים מסוימים, חיידקים למשל, לצרכיו. מדעי החיים מהווים היום חלק בלתי־נפרד מהתרבות המערבית. בשנים האחרונות מתרחב העניין במדעי החיים בקרב הציבור, מחוץ לטווח הרגיל של ביולוגים, רופאים וחובבים להוטים. התעניינות חדשה זו נובעת כנראה ממיפגשם של כמה גורמים.

ראשית, החל להתפשט הרעיון, שחיים על־פני כדור־הארץ מייצגים שיווי־משקל כה עדין, עד שאי־אפשר לפגוע בו מבלי להיענש. מאז ומעולם נאבק האדם בסביבתו: תחילה כדי לשרוד בה, אחר־כך כדי לשלוט ולהשתמש בה. לאחרונה הבין האדם, שאין הוא יכול עוד להשיג הצלחה גדולה מבלי שהוא עצמו יינזק; שאין הוא יכול להשחית בלי סוף, לקטול, לספק את חמדנותו מבלי להרוס את עצמו. ההידרדרות הנובעת מהחיים המודרניים, מהמלחמות, מהזיהום שמקורו בחקלאות או

בתעשייה ומעקירת היערות, גרמה להפרעה קשה לצורות חיות רבות, ואף הביאה להכחדה של מינים רבים. לדעת אנשים רבים, מדעי החיים צריכים לאפשר את כינונם של יחסים חדשים בין האדם וגם צורות חיות אחרות ובין סביבתם. מדעי החיים נעשו גורם הכרחי בחיפוש אחר שיווי-משקל אקולוגי חדש.

שנית, בעשרות השנים האחרונות התברר, שמדעי החיים יכולים להשפיע על מבנה החברה ומנהגיה. אין דבר זה תוצא טכני בלבד, שאיננו תלוי בפעולה חברתית או פוליטית. אפשר להתווכח באריכות, מהו התפקיד היחסי שמילאו אמצעי מניעה כימיים בפעולות מסוימות – כמו מתן זכות בחירה לנשים, או ביחסים החדשים שבין גברים לנשים. אבל ברור שללא הגלולה למניעת הריון – כלומר מבלי להשיג שליטה באימהות – לא יכול היה מעמדן של הנשים להשתנות בקצב כזה. אם תוחלת החיים בחברות המערביות הוכפלה במאה השנים האחרונות, הרי זה בוודאי בזכות המאמץ המשולב של מוסדות לבריאות הציבור ופעולות רפואיות. כאן שוב, לא היה אפשר להגיע לתוצאה זו במהירות כה רבה מבלי שתתמקד ההשגחה הרפואית ביילודים ובילדים קטנים. כיום אנשים מדברים לעתים קרובות על 'רפואנות' והתעללויות שלה. אולם כוחות כלכליים ותרבותיים שונים הם המניחים את ידיהם על האזרח ולאן דווקא הרופאים.

לבסוף, בעשורים האחרונים גם חלה תמורה בביולוגיה עם הופעתו של שטח חדש, ביולוגיה מולקולרית. ביולוגיה זו באה להסביר את התכונות והביצועים היוצאים מן הכלל של יצורים חיים על-פי המבנה של המולקולות המרכיבות אותם ועל-פי יחסי-הגומלין ביניהן. בתוך שנים מעטות היתה לביולוגיה המולקולרית הצלחה גדולה, במיוחד בתחום התורשה, שכן הכימיה של התורשה פוענחה לפרטיה. תוצאות אלו שינו לגמרי את אופן-ההתבוננות שלנו בתיפקודם של היצורים החיים, ובכלל זה האדם. מוזר למדי, שנתונים גנטיים משמשים לעתים קרובות בידי אידיאולוגיות אשר, בהחיותן ויכוחים מיושנים על תכונות אופייניות גורשות ונרכשות, אינן מהססות לעוות נתונים

מדעיים למטרה פוליטית. אולם אפשרות היישום של הביולוגיה המולקולרית חשובה יותר מן התיאוריה. התפתחה טכנולוגיה חדשה שלמה, הנדסה גנטית, המטפלת במיוחד בבידוד, בניקוי ובניתוח מפורט של הגנים, והעברתם מיצור אחד למשנהו. אנשים רבים, אשר לפני כן לא התעניינו כלל בביולוגיה, גילו לפתע עניין בהמצאותיה האפשריות. בהתאם למצב־רוחם, הם מנבאים יצירתן של מפלצות שיוכלו להרוס את האנושות, או של יצורים מופלאים שיוכלו להצילה. אולם גם ללא הראשונות או האחרונות, הביוטכנולוגיה המודרנית יכולה להיות לעזר בתחומים שונים.

הסיבות שמדעי החיים מעוררים היום עניין חדש הן איפוא רבות ושונות. אין צורך להסתיר את העובדה, שסקרנות מדעית בלבד ממלאה רק תפקיד צנוע בדרך התקדמותו של המדע. בדרך־כלל, הגורמים המעורבים העיקריים הם, במקורם, חברתיים־כלכליים או אפילו פוליטיים. קשה להגדיר מה באמת דוחף את ההתפתחות המדעית בחברות המערביות. אין ספק שהתפתחויות מדעיות וחברתיות קשורות זו לזו, אולם מבלי שתהיינה ממוזגות. מדענים עשויים לחשוב, כי למדע תפקיד מוביל, אולם בדרך־כלל לא כן הוא הדבר; ברור שמלחמות הן כוח מניע הרבה יותר חזק. לאמיתו של דבר, גורמים רבים תורמים להתפתחות המדע, וניתן להגדיר שלוש מגמות עיקריות – סקרנות, צורך ותועלת – שלכל אחת מהן יש מעצורים וגבולות, והן מתחברות ביחסים שונים לפי הנושאים, האזורים והזמנים.

בשנות ה-60 התפתחו מדעי החיים בתנופה והשיגו גילויים מרהיבים. בשנות ה-70, ברוב ארצות המערב, הם, יישומיהם והתועלת שבצידם היו נתונים תחת ביקורת קשה. מאז תחילת שנות ה-80 החלה להתפתח תפישה הרבה יותר שימושית של המדע, המכוונת בצורה מדויקת יותר למחקר של בעיות המעניינות את החברה באופן ישיר.

מכאן השאלה: מדעי החיים, לאן? אין לכך כל תשובה טובה.

מדענים יודעים שאקסטרפולציה של המדע אל העתיד וניבוי יישומיו והשפעותיו האפשריים היא תרגיל מפוקפק במיוחד. הם מיטיבים לדעת שהם הולכים בבירור לטעות, שכן תכונת יסוד אופיינית של המחקר המדעי היא היותו בלתי־צפוי, במיוחד במדעי החיים, בגלל מורכבותם. במדע בסיסי יש שני מרכיבים. אחד מהם מבוסס ישירות על ידע קיים; זה מאפשר לנבא איך עשוי מחקר להתפתח בחמש או עשר השנים הבאות. האחר נובע מדרך־התבוננות חדשה בבעיות או של העמדת שאלות; זה נשאר מחוץ לכל ציפיות שהן. בשלהי שנות ה-40 של המאה ה-20, עם הופעתה של הביולוגיה המולקולרית, לא היתה כל תוכנית מאורגנת שהציעה לביוכימאים לחבור לגנטיקאים ולפיסיקאים. באותם ימים לא יכול איש לנבא, שהכימיה של התורשה תפוענח לפני הכימיה של הגידים. האמריקאים, על מפעליהם העצומים, הראו שאפשר לממש מחקר יישומי, כגון מסע לירח, אך לא מחקר בסיסי, כגון ריפוי מחלת הסרטן. הבלתי־צפוי הוא בלב לבו של התהליך המדעי.

הביולוגיה שונה ממדעים אחרים, למשל הפיסיקה, בגלל תהליכי התורשה והאבולוציה. ספר זה הוא ההיסטוריה של הדרך שבה הסתכל העולם המערבי בתורשה מאז המאה ה-16. המדע נתפש לעתים קרובות מדי דרך יישומיו, תוצאותיו החברתיות והפוליטיות, ולא דווקא כשהוא לעצמו, כרכישה של ידע. אולם אי־אפשר לתאר את השימוש במדע ובה בעת להתעלם מתכניו ודרכיו.

אני שמח שספרי מופיע בשפה העברית ומקווה שימצא קהל קוראים נרחב בישראל.

פרנסואה ז'אקוב

פריס, 1991

הערת העורך

'הלוגיקה של החי' הופיע לראשונה בצרפתית בשנת 1970, ובתרגום אנגלי בשנת 1973. המהדורה העברית תורגמה מאנגלית והשוותה עם המקור הצרפתי. כתיבתו של ז'אקוב עניינית מאוד אך לפרקים פיוטית, ולפיכך ניסינו גם אנו להיצמד לרוח הדברים. העדפנו תמיד מונחים שגורים וברורים והשתדלנו לשמור על שטף קריאה בהיר, אך גם הקפדנו להבחין בין מין (species) לזוויג, בין התרבות לרבייה והכפלה, בין תוכנית לתוכנה, וכדומה. שמות החוקרים וההוגים מובאים בגוף הספר בעברית בלבד; בסוף הספר, בנספח, הם מובאים בעברית ובלועזית, יחד עם הערות ביוגרפיות קצרות.

חלפו למעלה מעשרים שנה מאז הופיע הספר, אולם על-אף ההתקדמות הרבה והגילויים הנוספים במחקר הביולוגי בתקופה זו, אין בהם כדי לשנות את ההיסטוריה של הביולוגיה ושל התורשה. שתי התרומות המרכזיות, אשר הניחו את הבסיס המולקולרי למנגנון התורשה ולפעולתו – פענוח הד.ג.א. ומודל הבקרה של פעילות הגנים – גם סללו את הדרך להתפתחותה של הביולוגיה המולקולרית על סעיפיה השונים. בפרק האחרון של הספר מתוארים צעדיו הראשונים של ענף חשוב זה בביולוגיה המודרנית, ונידונות ההשלכות וההשפעות שלו על מדעי האדם, על הנאורופיסיולוגיה ועל התודעה. המות, שבו ממוקדים הרצון וכוח הבחירה, מעמיד לפנינו אתגר שונה, מרחב

אשר לו כללים אחרים, כדברי רנטו דולבקו, מגדולי החוקרים של הביולוגיה המולקולרית: 'הצעד האחרון ביותר של האבולוציה – המוח המצוי בצורה זו או אחרת במרבית צורות החיים – היה לכות [הביולוגי] בעל העוצמה הרבה ביותר, שהגיע לשיאו באדם. המוח מציע פתרונות חדשים לבעיות החיים, בחלקו תוך עידוד השיטות שאומצו על-ידי הטבע, אך גם בדרכים חדשות. המוח מביא לאדם ערכים חדשים, שונים מאלה שאומצו על-ידי הטבע; הוא יוצר את הסביבה החדשה של אידיאות, אשר הופכות למנוע בעל עוצמה בהיבטים שונים של החיים. המוח נוטה להפוך את תהליך ההתפתחות של החיים כשהוא בוחר בתוכניות המבוססות על מושגים שאותם הוא מעריך כאפשריים, ולא בשיטה של הטבע על-ידי ניסוי וטעיה' (The Design of Life, 1987).

הביולוגיה המולקולרית ראתה בעשרים השנים האחרונות פריחה גדולה, שכלול והישגים שכמוהם לא נודעו קודם לכן. הפרק על המולקולה הוא, מטבע הדברים, מעודכן פחות מן השאר. אולם המימוש המרשים של מרבית הציפיות המתוארות בו, ממחיש עד כמה ההצלחות המופלאות בשטח זה הן פרי הפענוח והיישום של העקרונות שהונחו ביסודו של ענף זה בתחילתו. לאן יוליך המחקר הביולוגי, באיזה מישור הוא יתעכב עכשיו, או בדימויו של ז'אקוב, איזו 'בובה רוסית' תתגלה לפנינו בעתיד? אלו הן שאלות שלא ניתן לתת להן תשובות היום, ואף לא לנבאן. כיום ברור כי הביולוגיה כבר רכשה מעמד שווה-זכויות לשאר תחומי המדע הניסויי, וכי ניתן להגדיר ולנסח בבהירות רבה את השאלות המתעוררות, ואולי אף את הכיוונים המתבקשים. אבל תהיה התקדמות המדע, וביולוגיה בתוכו, מרשימה ככל שתהיה, צריך להיזהר מאשליות. התשובות על שאלות-היסוד בדבר מהות האדם, משאלותיו ואפשרויותיו, יוסיפו להישאר מחוץ למסגרת זו.

פרופסור ישעיהו ליבוביץ כתב לספר זה מסה ממצה, שבה הוא מעיין בקשר שבין תורשה, התפתחות ואבולוציה, ותוהה האם מסבירה התורשה את ההתפתחות. השאלה מדוע חלה

ההתפתחות בדרך זו ולא אחרת תוסיף להישאל גם לאחר שיובנו ויובהרו לאשורם פעולתם וטיבם של הגנים ההומאובוקסיים, למשל, השולטים בתהליכים המורפוגנטיים בהתפתחות העובר ומנטרים אותם. וכאן מן הראוי לחזור לשאלת התכליתיות שנדרש לה ז'אקוב והוא שב ודן בה בספרו. הוא קובע, שחל שינוי במעמדה של הטלאולוגיה בעיני הביולוג. אם עד כה היתה בעיניו 'כאותה אשה שאיננו יכול בלעדיה, אולם איננו מעז להיראות עמה בציבור', הרי עם התכונה המוצפנת בצופן הגנטי זכתה הטלאולוגיה ל'מעמד רשמי'.

התוכנה

תופעות מעטות בעולם־החי נהירות כל־כך לעין כול כמו ההיווצרות של דומה מתוך דומה. אפילו ילד יכול להבחין במהרה שכלב נולד מכלב ותירס מקורו בתירס. כבר בשלב מוקדם בהתפתחותו למד האדם לפרש את התמד הצורות ברצף הדורות ולנצל בטיפוח צמחים, בהכלאת בעלי־חיים ובשיפורם לצורכי מאכל או עבודה. בכל הפעולות האלה כרוך ניסיון רב, והן גם מצביעות על הבנה מסוימת של כללי התורשה וכיצד יכול האדם לנצלה לרווחתו. כדי להשיג יבול טוב, לא די היה להמתין לירח מלא או להקריב לאלים לפני הזריעה, צריך היה גם לדעת לברור את הזרעים המתאימים. בתקופה הפרה־היסטורית היו האיכרים דומים במידת־מה לגיבורו של וולטיר, שהחליט לחסל את אויביו בעזרת תערובת של תפילות, לחשים ורעל ארסן. אולם כאשר מדובר בעולם־החי, מתברר שקשה במיוחד להפריד בין רעל ארסן ללחשים. שכן, גם לאחר שהתבררו מעלותיה של השיטה המדעית בעולם הפיסיקלי, אלה שחקרו את עולם־החי הוסיפו לחשוב, במשך כמה דורות, על מקורם של יצורים חיים במונחים של אמונות, סיפורי־מעשיות ודעות קדומות. אף־על־פי שדי היה בעריכת כמה ניסויים פשוטים, כדי להפריך את הדעה בדבר בריאה ספונטנית והכלאות בלתי־אפשריות, הרי עד המאה ה-19 החזיקו מעמד, בצורה זו אחרת, כמה היבטים של המיתוסים העתיקים על מוצא האדם, החיה והאדמה.

כיום, תורשה מתוארת במונחים של מידע, מסרים וצופן. הרביה של

אורגניזם היא זו של המולקולות המרכיבות אותו. לא משום שלכל סוג כימי יש יכולת ליצור עותקים של עצמו, אלא מפני שמבנה המקרומוולקולות נקבע, עד לאחרון פרטיו, על־פי רצפים של ארבעה רדיקלים כימיים המוכלים במטען הגנטי. מה שמועבר מדור לדור הן ה'הוראות' המגדירות את המבנים המולקולריים: התוכניות הארכיטקטוניות של האורגניזם העתידי. ההוראות הן גם האמצעים להוצאה לפועל של התוכניות האלו ולהתאמת פעילויות המערכת. כל ביצית מכילה בכרומוזומים שקיבלה מהוריה את כל עתידה, את שלבי התפתחותה, את צורתו ותכונותיו של היצור שיופיע. כלומר, האורגניזם הוא מימוש של תוכנה שהוכתבה על־ידי התורשה. את המקום של מה שנחשב בעבר כוונה של נפש תפס עתה תרגום של מסר. היצור החי אכן מייצג את הוצאתה לפועל של תוכנית, אך אין זו תוכנית שתבונה כלשהי המציאה; היא פועלת לקראת תכלית, אך אין זו תכלית שנבחרה על־ידי רצון כלשהו. התכלית היא הכנת תוכנה זהה בשביל הדור הבא. התכלית היא התרבות.

אורגניזם הוא אך בן־חלוף, שלב בין מה שהיה ובין מה שיהיה. רביה מייצגת את ההתחלה ואת הסוף כאחד, את הסיבה ואת התכלית. עם יישומו של המושג 'תוכנה' לתורשה נעלמות סוף סוף כמה סתירות ביולוגיות, שסוכמו בעבר בסדרה של אנטיטוזות: תכליתיות ומנגנון, כורח ואקראיות, יציבות ווריאציות. המושג 'תוכנה' מצרף שני רעיונות שנקשרו תמיד אינטואיטיבית עם יצורים חיים: זיכרון ותרשים. 'זיכרון', משמע זכר ההורים, שבגלל התורשה מופיע בצאצא. 'תרשים', משמע תוכנית המפקחת על היווצרותו של אורגניזם, עד לאחרון פרטיו. חילוקי דעות רבים התעוררו סביב שני הנושאים האלה. ראשית, על הורשה של תכונות אופייניות (characters) נרכשות. הרעיון שסביבה יכולה להשפיע על תורשה מייצג בלבול מובן בין שני סוגי זיכרון: גנטי ומנטלי. זהו סיפור ישן־נושן, שיש לנו עדות עליו כבר בסיפור התנ"כי. כזכור, כדי להימנע מאי־הבנות עם לבן תותנו, ניסה יעקב לגדל כבשים שנקל יהיה להבחין ביניהן על־פי סימנים בפרוותם: וַיִּקְחֵלּוּ יַעֲקֹב מִקֵּל לְבָנָה לַח וְלוֹז וְעָמּוֹן, וַיַּפְצֵל בֵּהֶן פְּצָלוֹת לְבָנוֹת מִחֶשֶׁף הַלָּבָן אֲשֶׁר עַל־הַמְּקָלוֹת: וַיַּצַּג אֶת־הַמְּקָלוֹת אֲשֶׁר פָּצַל בְּרֹהֲטִים בְּשֶׁקֶתוֹת הַמִּים אֲשֶׁר תָּבֵאן הַצֹּאן לְשִׁתּוֹת לְנֶכֶח הַצֹּאן; וַיַּחֲמֶנָה בְּבֹאֵן לְשִׁתּוֹת:

נִתְּחַמוּ הַצֵּאן אֶל־הַמְּקֻלּוֹת וַתִּלְדֶּן הַצֵּאן עֶקְדִים וְקָדִים וְקָלָאִים' (בראשית ל, 37-39). במשך מאות שנים נערכו ניסויים רבים לאין ספור מסוג זה, שלא תמיד זכו באותה מידה של הצלחה. לדידה של הביולוגיה המודרנית, מה שאופייני במיוחד ליצורים החיים הוא יכולתם לשמר את נסיון העבר ולהעבירו לדורות הבאים. כל אחת משתי נקודות-המפנה באבולוציה – תחילה הופעת החיים, ומאוחר יותר הופעת המחשבה והשפה – מקבילות להופעתו של מנגנון זיכרון מסוג שונה: זה של התורשה וזה של המוח. קיימות אבולוגיות מסוימות בין שתי המערכות. ראשית, משום ששתיהן נבררו כדי לצבור את נסיון העבר ולהעבירו הלאה. שנית, משום שבשתיהן נשמר המידע הרשום רק במידה שהוא מועתק בכל דור ודור. אולם מדובר בשתי מערכות השונות זו מזו בטבען ובלוגיקת הפעולה שלהן. בזכות גמישותם של מנגנוניו, הזיכרון המנטלי מכשיר אותו במיוחד להעברת תכונות אופייניות נרכשות; בזכות נוקשותם של מנגנוניו, הזיכרון הגנטי מונע העברה מעין זו.

התוכנה הגנטית בנויה מצירוף של אלמנטים שבעיקרו של דבר אינם משתנים. בזכות המבנה שלו, המסר של התורשה איננו מאפשר כל התערבות מבתוך, ולו הקטנה ביותר. כל התופעות – בין שהן כימיות ובין שהן מכניות – התורמות לווריאציות של אורגניזמים ואוכלוסיות, מתרחשות ללא קשר עם תוצאה; אין הן קשורות לצורך של האורגניזם להסתגל. במוטציה, יש 'גורמים' המשנים רדיקל כימי, שוברים כרומוזום, או הופכים מיקטע של חומצת-גרעין. אולם אין, אף לא באחד מן המקרים, זיקה בין סיבת המוטציה ובין התוצא שלה. אקראיות זו גם איננה מוגבלת למוטציות בלבד. היא ישימה בכל שלב של יצירת המטען הגנטי של הפרט היחיד, ההתפלגות של הכרומוזומים, הרקומבינציה שלהם, הבחירה של הנְמְטוֹת, הממלאות תפקיד בהפריה, ובמידה מרובה אף בבחירת בני-הזוג המיניים. אין שום קשר, ולו גם הזעיר ביותר, בין עובדה מסוימת ובין תוצאותיה בכל אחת מהתופעות הללו. כל תוכנה ותוכנה של פרטיחיד היא תוצאה של רצף אירועים, כולם אקראיים. עצם טבעו של הצופן הגנטי מונע כל שינוי מכוון בתוכנה, אם כתוצא של פעולתו או של הסביבה. הוא אוסר כל השפעה של תוצרי הביטוי על המסר שהכתיב אותם.

התוכנה איננה לומדת לקחים מניסיון. תרשים הוא רעיון אחר, שהיה קשור תמיד אינטואיטיבית עם האורגניזם. כל עוד נראה עולם־החי כמערכת המנוטרת מבחוץ, כל עוד הניחו שהוא מנוהל מבחוץ על־ידי כוח עליון, לא התעוררו שום קשיים בדבר מוצאם של היצורים החיים או בדבר התכליתיות שלהם; הם היו חלק מהמוצא והתכליתיות של היקום עצמו*. אך לאחר שכוננה הפיסיקה כמדע בתחילת המאה ה-17, חקר היצורים החיים ניצב לפני סתירה. מאז ואילך הלך וגדל הניגוד בין הפירוש המכניסטי של האורגניזם מזה, ובין התכליתיות הברורה של תופעות מסוימות, כמו למשל התפתחות הביצית לבוגר או התנהגות בעלי־חיים מזה. קלוד ברנאר סיכם את הסתירה במלים אלו:

אפילו אם אנו מניחים שתופעות ויטליות קשורות להתבטאויות פיסיקליות־כימיות, דבר שהוא נכון, אין זה פותר את השאלה בכללותה, שכן לא מיפגש סתמי בין תופעות פיסיקליות־כימיות הוא היוצר כל יצור בהתאם לתוכנית ותרשים שנקבעו מראש... התופעות הוויטליות ודאי שהן מתרחשות בתנאים פיסיקליים־כימיים מוגדרים היטב; אך־בו בזמן הן כפופות לחוק שנקבע מראש ומופיעות בסדרות, זו אחר זו, בהתאם לחוק זה. הן חוזרות שוב ושוב באופן סדיר וקבוע. יש ביניהן הרמוניה הדדית, במגמה להשיג את ארגונו וגדילתו של הפרט, בעל־חיים או צמח; לכל יצור ולכל איבר יש מעין תוכנית שנקבעה מראש וכך, כל תופעה בכלכלת היצור, אם בוחנים אותה בנפרד הריהי שלוחה של כוחות הטבע הכלליים; אך כאשר בוחנים את קשריה עם שאר התופעות, היא מגלה שקיים קשר מיוחד: דומה שמורה־דרך בלתי־נראה מכוון את התופעה ומנהיג אותה למקום המיועד לה.¹

אין צורך לשנות ולו מלה אחת בשורות אלה כיום. אין בהן דבר שהביולוגיה המודרנית איננה סומכת ידה עליו. אולם, כאשר תורשה מתוארת כתוכנה, המוצפנת ברצף של רדיקלים כימיים – הסתירה נעלמת.

כל דבר ביצור החי מתרכז בהתרבות. חיידק, אמבה, שרץ – על איזה

* סופיות (finality) – כאן, מושג זה בא לתאר הן התנהגות תכליתית, והן עיקרון של חסיבה הסופית, המשמש עיקרון פועל ביקום.

ייעוד אחר יכולים הם לחלום אם לא על יצירה של שני חיידקים, שתי אמבות, או שרכים רבים יותר? אם יש כיום יצורים חיים על־פני כדור־הארץ, הרי זה משום שיצורים אחרים התרבו בשקיקה עצומה במשך שני מיליארדי שנה או יותר. אם נדמיין לעצמנו עולם בלתי־מאוכלס, נוכל לחשוב על כינון של מערכות הניחנות בתכונות חיים כלשהן, כמו למשל, היכולת להגיב לגירויים מסוימים, להטמיע, לגשום, או אפילו לצמוח – אבל לא להתרבות. התוכלנה מערכות מעין אלה להיקרא מערכות חיות? כל מערכת כזאת מייצגת פרי של מאמץ ארוך ומייגע. כל לידה היא אירוע יחיד במינו ללא מחר. כל פעם זוהי התחלה מחדש. למערכות כאלה יכול להיות רק קיום ארעי, כי הן נתונות לתסדיה של שואה מקומית. יתרה מזו, המבנה של מערכות אלה הוא נוקשה מלכתחילה, ואין הוא יכול להשתנות. אם, לעומת זאת, מופיעה מערכת שיש לה יכולת להתרבות, גם אם יכולת זו היא גרועה, איטית, והמחיר שהיא נדרשת לשלם הוא גבוה – אין כל ספק שלפנינו מערכת חיה. היא תלך ותתפשט בכל מקום שהתנאים יאפשרו זאת, וככל שתוסיף להתפשט, כן תהיה מוגנת מאסון. מן הרגע שהסתיימה תקופת הדגירה הממושכת, המערכת תלך ותתבסס על־ידי חזרה על אירועים זהים. הצעד הראשון נעשה אחת ולתמיד. אולם במערכת כזאת, ההתרבות, שהיא עצם סיבת הקיום, הופכת גם להיות תכלית המערכת. המערכת נידונה להתרבות או להיעלם. יש יצורים שהופיעו זה אחר זה במשך מספר עצום של דורות מבלי להשתנות. יש צמחים חד־שנתיים שלא חל בהם שינוי במשך מיליוני שנים, ולפיכך לפחות במשך מספר דומה של מחזורי־חיים רצופים. הלימולוס (Limulus), סרטן־המלך של חוף הים, עדיין זהה לאבי־אבותיו, כפי שנמצא במאובנים מהעידן הגיאולוגי השניוני: במשך כל הזמן הזה לא חל שינוי בתוכנה שלו, וכל דור ממלא בדייקנות את התפקיד שלו ומכין בדיוק את אותה התוכנה בשביל הדור הבא.

אך אם מתרחש במערכת אירוע ה'משפר' את התוכנה ומקל בדרך כלשהי על ההתרבות של צאצאים מסוימים, מובן שהללו יורשים את היכולת להכפיל את עצמם ביעילות רבה יותר. התכליתיות של התוכנה היא עצמה גורמת ששינויים מסוימים המתרחשים בה

ייהפכו לגורמי הסתגלות. שהרי ההשתנות היא איכות הטבועה בעצם טבעו של כל החי, במבנה התוכנה, באופן שהיא מתועתקת בכל דור. השינויים בתוכנה מופיעים באקראי. רק לאחר מכן מתרחשת פעולת המיון, וזאת בגלל העובדה שכל אורגניזם, עם הופעתו, עומד מיד למבחן ההתרבות. 'מלחמת הקיום' המפורסמת מייצגת אך ורק מאבק להבאת צאצאים – תחרות אינסופית, המתחילה מחדש בכל דור. בתחרות נצחית זו יש רק אבן-בוחן אחת – פוריות. הפורה ביותר מנצת אוטומטית במשחק-הגומלין המתוחכם המתקיים בין אוכלוסיות לסביבה. מאחר שרבייה נוטה תמיד לבעלי הצאצאים המרובים ביותר, בסופו של דבר היא מכוונת אוכלוסיות לאורך נתיבים מוגדרים היטב. ברירה טבעית מייצגת רק את ההכוונה שהסביבה אוכפת על התרבות האורגניזמים. אם עולם-החי מתפתח בכיוון מנוגד לעולם-הדומם, תוך חתירה להגדלת הסדר ולא האי-סדר, הרי זה בגלל דרישה זו להתרבות, הנאכפת על יצורים חיים – תמיד להתרבות יותר, תמיד טוב יותר. הכורח להתרבות, אשר ללא ספק היה גורם להתפרקותה של מערכת אינרטי, הוא גם ההופך למקור של חדשנות וגיוון בעולם-החי.

רעיון התוכנה מאפשר לערוך הבחנה ברורה בין שני תחומים של סדר שהביולוגיה מנסה לקבוע. בניגוד למה שנדמה לעתים קרובות, אין הביולוגיה מדע אחיד. ההטרונגניות של מושאי המחקר שלה, מיגוון הטכניקות שהיא משתמשת בהן, ותחומי ההתעניינות של החוקרים השונים, כל אלה מובילים לרבגוניות אינטלקטואלית. בקצוות מצויות שתי מגמות ראשיות, שתי גישות המנוגדות באופן בסיסי זו לזו. את הראשונה נוכל לכנות אינטגרציוניסטית או אבולוציוניסטית. גישה זו לא רק טוענת שלא ניתן להפריד את האורגניזם לרכיביו, אלא גם שלעתים קרובות אף רצוי לראותו כיסוד של מערכת מסדר גבוה יותר: קבוצה, מין (species), אוכלוסייה, או משפחה אקולוגית. ביולוגיה זו עוסקת בקהילות, בהתנהגות, ביחסים שהאורגניזמים מפתחים זה עם זה או עם סביבתם. היא מחפשת במאובנים עקבות של הופעת הצורות החיות בימינו. מאחר שהיא מתרשמת מהרבגוניות היוצאת מן הכלל של היצורים, היא מנתחת את מבנה עולם-החי ומחפשת מה גרם להופעת תכונות אופייניות שונות ומתארת את מגווני ההסתגלות

שלהם. המטרה שלה היא להגדיר את הכוחות ואת הגורמים שיצרו את המערכות החיות בפאונה ובפלורה המצויים עתה סביבנו. הביולוג מאסכולה זו מתעניין באיבר ובתיפקוד רק כחלק משלם; ואין מדובר באורגניזם בלבד אלא במין כולו, על מגבלותיו השונות: מיניות, טרף, אויבים, תקשורת וטקסים. ביולוג זה מסרב להאמין, שניתן להסביר את כל תכונותיו, התנהגותו וביצועיו של יצור חי אך ורק על-ידי המבנים המולקולריים שלו. לדידו, הביולוגיה אינה צריכה להצטמצם לפיסיקה וכימיה, לא מפני שהוא שואף לעורר באופן מיסטי כוח ויטלי, אלא משום ששילוב, בכל הרמות, מעניק למערכות תכונות שאין יסודותיהן ניתנים בהן. השלם איננו אך ורק סכום חלקיו.

בקוטב האחר של מדע הביולוגיה נמצא את הגישה השניה שניתן לכנותה טומיסטית או רדוקציוניסטית (צמצומית). לפיה, האורגניזם הוא אמנם שלם, אולם שלם שצריך להסבירו אך ורק על-ידי התכונות של חלקיו. לפיכך, היא מתעניינת באיבר, ברקמה, בתא, במולקולות. היא שואפת להסביר תיפקודים על-ידי מבנים בלבד. מאחר שהיא מודעת לאחדות של הרכב ותיפקודיות, המצויים בתשתית רבגויותם של היצורים החיים, היא רואה את ביצועיו של האורגניזם כביטוי של הריאקציות הכימיות המתרחשות בו. ביולוג מאסכולה זו מאמין, שצריך לבודד את רכיבי היצור החי ולחקור אותם בתנאים מבוקרים. על-ידי גיוון תנאי הניסוי, עריכת ניסויים חוזרים ונשנים, הגדרת כל מדד, הוא מנסה לשלוט במערכת ולסלק את המשתנים. הוא שואף לפרק את המורכבות, עד כמה שהדבר אפשרי, כדי לחקור את יסודותיו באותה דרגת ניקיון ודיוק האופיינית לניסויים בפיסיקה ובכימיה. לדידו, אין שום תכונה אופיינית של האורגניזם שלא ניתן לתארה, בסופו של דבר, במונחים של מולקולות ושל פעולות-הגומלין שלהן. מובן שאין כאן שאלה של הכחשת התופעות של שילוב והופעה. ללא שום ספק, השלם יכול להיות ניחן בתכונות החסרות ביסודותיו, אך תכונות אלו הן תמיד התוצאה של מבנה היסודות עצמם ושל סידורם.

מסתבר איפוא שיש הבדל בין שתי הגישות האלה לא רק בשיטה

ובמטרה, אלא גם בשפה, במושגים, ולפיכך גם בהסברים הסיבתיים של עולם-החי. האחת מעוגיינת בסיבות רחוקות שהיו מעורבות בהיסטוריה של כדור-הארץ ושל יצורים חיים במשך מיליוני דורות. לעומת זאת, האחרת מעוגיינת בסיבות מיידיות, המשפיעות על רכיבי האורגניזם, על התיפקודיות שלו ועל תגובותיו לסביבה. חלק נכבד מהמחלוקת ומהאי-הבנה, במיוחד בקשר לתכליתיות של היצורים החיים, נגרמות בשל הבלבול השורר בין שתי גישות אלה בביולוגיה. כל אחת מנסה לקבוע מערכת של סדר בעולם-החי. לדידה של האחת, זהו הסדר הקושר את היצורים זה לזה, בונה יחסי צאצאות ומסדיר את החלוקה למינים. לדידה של השנייה, זהו הסדר בין המינים, הקובע את התיפקודים, מתאם את הפעילויות, המשלב את האורגניזם. האחת רואה יצורים חיים כיסודות של מערכת רחבה, החובקת את כל כדור-הארץ. השנייה מתעניינת במערכת שיוצר כל יצור חי. האחת מבקשת לכוון סדר בין אורגניזמים; השנייה בתוך כל אורגניזם. שני סוגי סדר אלה נפגשים ברמת התורשה, שהיא כביכול הסדר של הסדר הביולוגי. אם המינים יציבים, הרי זה משום שהתוכנה מתועתקת בקפדנות, סימן אחרי סימן, מדור אחד למשנהו. אם המינים מגוונים, הרי זה משום שהתוכנה משתנה מדי פעם בפעם. מצד אחד, צריך לגתח את מבנה התוכנה, את הלוגיקה שלה ואת הוצאתה אל הפועל; מצד אחר, צריך לחקור את ההיסטוריה של התוכנות, את הסחיפה שלהן, ואת החוקים שלפיהם הן משתנות ברצף הדורות בהתאם למערכות אקולוגיות. אבל בכל המקרים, תכליתיות הרבייה היא המצדיקה הן את המבנה של מערכות חיות בימינו והן את ההיסטוריה שלהן. האורגניזם הקטן ביותר, התא הקטן ביותר, מולקולת החלבון הזעירה ביותר, כל אחד מאלה הוא תוצאה של ניסויים רבים מספור, שנערכו ללא הפסק במשך שני מיליארדי שנים. איזו חשיבות יכולה להיות למנגנון המנטר את יצירתו של מטבוליט על-ידי תא, אם לא חיסכון בסינתזה ובאנרגיה? או להשפעתו של הורמון על התנהגותו של דג, אם לא כדי שייגן על צאצאיו? יש תכליות ברורות מדוע מולקולת ההמוגלובין משנה את צורתה בהתאם ללחץ החמצן; מדוע תא של בלוטת יותרת הכליה יוצר קורטיזון; מדוע עין הצפרדע רושמת את הצורות הנעות לפנייה; מדוע העכבר בורח מהחתול; מדוע הציפור-הזכר 'רוקד' לפני הנקבה. בכל אחד

מהמקרים האלה, תכונה אחת היא המעניקה יתרון לאורגניזם בתחרות להביא צאצאים משלו לעולם. התאמת תגובה לפי סביבה, אויב־בכוח או בן־זוג מיני אפשרי, זוהי בדיוק משמעות ההסתגלות. בביררה טבעית, לתוכנה גנטית הכופה תגובות כאלה באורח אוטומטי יש עדיפות על פני תוכנה שאיננה עושה זאת. הוא הדין בתוכנה המאפשרת למידה וסיגול־התנהגות בעזרת מערכות בקרה שונות. בכל המקרים, ההתרבות פועלת כגורם־המפעיל העיקרי בעולם־החי: מצד אחד, היא מציבה יעד לכל אורגניזם; מצד אחר, היא גותנת כיוון להיסטוריה חסרת־היעד של האורגניזמים. זמן רב התייחס הביולוג לטְלֵאולוגיה כלאותה אשה שאיננו יכול בלעדיה, אולם איננו מעז להיראות עמה בציבור. מושג התוכנה העניק לטלאלוגיה מעמד רשמי.

הביולוגיה המודרנית שואפת לפרש את תכונותיו של האורגניזם על־פי מבנה המולקולות המרכיבות אותו. במובן זה, הביולוגיה המודרנית תואמת לתקופה החדשה של המכניזם. התוכנה מייצגת מודל השאול מתחום המחשבים האלקטרוניים. היא משווה את החומר הגנטי של הביצית עם הסרט המגנטי של המחשב. היא גורמת שתבוצע סדרה של פעולות, את הנוקשות של הרצף שלהן בזמן, והמטרה שנקבעה. למעשה, שני סוגי תוכנה אלה שונים זה מזה מבחינות רבות. ראשית בתכונותיהן. אחת יכולה להשתנות לפי רצון, האחרת לא: בתוכנת מחשב ניתן להוסיף מידע או להחסירו בהתאם לתוצאות המתקבלות; לעומת זאת, מבנה חומצת־הגרעין איננו נגיש לניסיון נרכש והוא נשאר ללא שינוי במהלך הדורות. שתי התוכנות שונות זו מזו גם בתפקיד שהן ממלאות וגם ביחסים שהן מקיימות עם האיברים המוציאים אל הפועל. הוראות המחשב אינן עוסקות במבנה הפיסי או בחלקים המרכיבים אותו. לעומת זאת, האורגניזם קובע את ייצור חלקיו, כלומר, של האיברים האחרים להוצאה אל הפועל של התוכנה. אך גם אם אפשר היה לבנות מחשב היכול להתרבות, הוא היה יכול להכין אך ורק עותקים של עצמו במצב שהוא נמצא בו באותו רגע בזמן. מאחר שכל המכוונת מתבלות עם הזמן, לא־טֵלֵאט היו ה'צאצאים' מושלמים פחות מ'הוריהם', ובתוך דורות ספורים היתה המערכת הולכת ונסחפת לקראת אי־סדר סטטיסטי, ובסופו של דבר גורל

ה'צאצאים' היה נגזר למוות. רבייתו של יצור חי, לעומת זאת, איננה הכנתו עותק של ההורה במצב שהוא בזמן ההולדה. כשאובייקט חדש נוצר, זוהי בריאתו של יצור חדש, סדרה של אירועים המובילים אותו ממצב תחילי למצב של ההורים. כל דור איננו מתחיל מאפס, אלא ממנימום ויטלי, כלומר, מתא. התוכנה מכילה את כל הפעולות שהמחזור הזה מבצע ומשלים, והן מובילות כל פרט־יחיד מינקות עד מוות. יתרה מזו, התוכנה הגנטית איננה מתוכנתת באופן נוקשה. לעתים קרובות מאוד היא רק קובעת את הגבולות שפעולת הסביבה יכולת להשפיע בתחומם, או גם נותנת לאורגניזם את היכולת להגיב, את הכוח להשיג מידע נוסף שאיננו מולד. תופעות כמו רגנרציה, או שינויים שהסביבה מחוללת בפרט־יחיד, מצביעים כמובן על דרגת גמישות מסוימת במימושה של התוכנה. ככל שהאורגניזמים נעשים מורכבים יותר וככל שעולה חשיבותה של מערכת העצבים שלהם, כן מציידות אותם ההוראות הגנטיות באפשרויות חדשות, כמו היכולת לזכור או ללמוד. אולם התוכנה ממלאה תפקיד גם בתופעות אלו: בלמידה, למשל, היא קובעת מה יכול להילמד ובאיזה שלב בחיים תחול הלמידה. בזיכרון, היא מציבה גבול על טבע הזכרונות, מספרם ומשכמם. הנוקשות של התוכנה משתנה איפוא בהתאם לפעולות. הוראות מסוימות מוצאות אל הפועל ככתבן, אחרות מתורגמות על־ידי יכולת או פוטנציאל. אולם בסופו של דבר, התוכנה עצמה היא הקובעת הן את דרגת הגמישות והן את טווח הווריאציות האפשריות.

*

ספר זה עוסק בהיסטוריה של התורשה ושל הרבייה. הוא בוחן את השינויים שחלו באופן התבוננותו של האדם בטבעם, במבניהם ובקביעותם של היצורים החיים ברצף הדורות. לרשותו של הביולוג עומדות שתי דרכים שונות לבדוק את ההיסטוריה של המדע שלו. אפשר לראותה כרצף של רעיונות והגינאלוגיה שלהם, כלומר, הוא מחפש את ה'קו' שהדריך את המחשבה בנתיבה עד לתיאוריות התקפות בימינו. זוהי היסטוריה 'מהופכת', הנעה לאחור צעד אחר צעד, מן ההווה אל העבר. תחילה נבחר החלוץ של ההיפותזה

בת־הזמן, אחר־כך החלוץ של החלוץ, וכן הלאה. גקודת־מבט כזאת על ההיסטוריה מאפשרת לרעיונות לרכוש עצמאות: הם מתנהגים במידת־מה כיצורים חיים. הם נולדים, הם מתרבים והם מתים. מאחר שיש להם ערך הסברתי, הם יכולים להתפשט ולכבוש. גקודת־מבט כזאת מניחה מראש מעין אבולוציה של רעיונות, שכוחות הברירה שלהם הם או סדרה של היפותוזות, ההולכות ומשתפרות בהתמדה, ושל היישומים שלהן, או סוג כלשהו של תכליתיות רציונלית. אם נוקטים גישה זו, למשל, הרי הניסויים שערך פרנצ'סקו רדי החלישו את רעיון הבריאה הספונטנית. בעקבות הניסויים של ספאלאנצאני המשיך רעיון זה לאבד את תקפותו, ולבסוף נעלם כליל בזכות הניסויים של פסטר. אולם אין זה מסביר, מדוע לא די היה בניסויים של ספאלנצאני כדי לשכנע את בני־דורו, ואילו כעבור מאה שנים, כשחזר פסטר על אותם ניסויים בשינויים קלים בלבד, יישב את כל הסוגיה במהירות ובפסקנות. הוא הדין בתיאוריית האבולוציה. אפשר לראות את לאמארק כקודמו של דארוין, את בופון כקודמו של לאמארק, את בנואה דה־מאיה כקודמו של בופון וכן הלאה. אך אין גישה זו מסבירה מדוע נדחו רעיונותיו של לאמארק כמעט לגמרי בראשית המאה ה-19 על־ידי אנשים כגתה, ארסמוס דארוין, וז'ורואה סנט הילר – דווקא אותם אנשים שחיפשו טיעונים לחיזוק רעיון הטרוספורמיזם.

הגישה החלופה להיסטוריה של הביולוגיה מנסה לגלות כיצד מושאים נעשים נגישים למחקר, ובכך מאפשרים לפתח תחומי מדע חדשים. גישה זו מצריכה ניתוח של טבע המושאים הללו וגם של גישות החוקרים, שיטות התצפית שלהם, והמכשולים שהרקע התרבותי שלהם הציב בדרכם. חשיבותו של מושג נמדדת לפי הערך האופרטיבי של התפקיד שהוא משחק בהכוונת תצפיות וניסויים. אין כאן רצף ליניארי, פחות או יותר, של רעיונות, שכל אחד נוצר מן האחר; במקום זה קיים מרחב שהמחשבה שואפת לתור אותו; שבו היא מבקשת להשליט סדר, שבו היא מגסה ליצור עולם של יחסים מופשטים שיהיו בהרמוניה לא רק עם תצפיות וטכניקות, אלא גם עם העבודה המעשית, הערכים והפרשנויות בני־הזמן. לפי גישה זו, חשיבותם של רעיונות שנדחו בימים עברו רבה לעתים כמו

חשיבותם של רעיונות שבהם הכיר המדע בן־הזמן, וחשיבותם של מכשולים שבדרך איננה גופלת מזו של דרכים עבירות. כאן פועל הידע בשני מישורים. כל תקופה מאופיינת על־ידי טווח האפשרויות, המוגדרות לא רק על־ידי תיאוריות ואמונות בנות־הזמן, אלא גם על־ידי עצם טבעם של המושאים הנגישים למחקר, המיכשור הקיים לחקירתם, ודרך התצפית והדיון בהם. רק בתוך טווח זה יכול ההיגיון לתמרן. בתוך הגבולות הקבועים האלה, הרעיונות פועלים, נבחנים ומתעמתים זה עם זה. מבין כל המונחים האפשריים צריך 'לשלוף' את זה המשלב באופן המוצלח ביותר את תוצאות החקירות. כאן נכנסת לתמונה הבחירה האישית. אולם בדיון אינסופי זה בין מה שמצוי בידינו ובין מה שעשוי היה להיות, בחיפוש אחרי סדק שיגלה אפשרות אחרת, שולי החופש העומדים לרשותו של החוקר היחיד הם לפעמים צרים מאוד. חשיבות החוקר היחיד הולכת ומתמעטת ככל שעולה מספרם של החוקרים. אם תצפית איננה נעשית כאן ועכשיו, קרוב לוודאי שתיעשה מחר במקום אחר. במשך זמן רב תהו בני־האדם מה היה קורה למחשבה המדעית אילו עסק ניוטון בליקוט תפוחים, דארווין היה רבי־חובל או איינשטיין היה שרברב (מה שלפי דבריו היה מעדיף להיות). במקרה הגרוע ביותר, עשוי היה לחול עיכוב בשנים מספר בהתפתחות תיאוריית הכבידה או בתיאוריית היחסות, ואולי פחות מכך בהתפתחות תיאוריית האבולוציה, שוואלאס הציגה בעת זבעונה אחת יחד עם דארווין. כשתיאוריה מופיעה מוקדם מדי, כמו במקרה של חוקי התורשה של מנדל, איש איננו שם לב אליה; אך משמגיע זמנה אצל קבוצה קטנה של מומחים, היא עשויה להתגלות בריבזמן בכמה מקומות. ולהיפך: משעה שהתקבלו, תיאוריות מדעיות תורמות יותר מכל דבר אחר לארגון מחדש של תחום האפשרי, משנות את דרכי־ההסתכלות וחושפות לאור יחסים או מושאים חדשים; בקיצור, הן משנות את הסדר הקיים.

גישה זו לעיון באבולוציה של מדע כמו הביולוגיה שונה לחלוטין מהגישה הקודמת. כבר אין מבקשים למצוא את 'דרך המלך' של הרעיונות, וגם אין בוחנים את מצעדה הבוטח של הקידמה לקראת מה שנראה עכשיו כפתרון. כלומר, אין משתמשים בערכים רציונליים בניימינו כדי לפרש את העבר ולבחון אותו ולמצוא

מבשרים למה שקורה בהווה. להיפך, גישה זו באה לציין את שלבי הידע השונים, להגדיר מעברים, ולגלות את התנאים המאפשרים למושאים ולפרשנויות להיכנס לתחומו של האפשרי. דחייתה של תורת הבריאה הספונטנית כבר איננה מופיעה כתהליך כמעט ליניארי, המוליך מרדי אל פסטר, דרך ספאלאנצאני. לפיה, דארווין כבר איננו אך ורק בנו של לאמארק ונכדו של בופון. באמצע המאה ה-19, הן היעלמותה של תורת הבריאה הספונטנית והן הופעתה של תיאוריית האבולוציה הופכות להיות פירותיה של המחשבה כולה. התפתחות המושגים על החיים ועל תולדות הטבע היו תנאים מוקדמים לשינוי שיבוא. לפני ששינויים אלה יכלו להופיע, צריך היה להסיר את הגבולות בין המינים, להבחין בין האורגני לאי־אורגני, ולסלק סדרה של מעברים המובילים באופן בלתי־מורגש כמעט מהאורגניזמים הפשוטים ביותר אל האורגניזמים המורכבים ביותר. בסופו של דבר, ליניאוס וקובינה – בקפדנותם, בדוגמטיות שלהם ובהתעקשותם להתייחס אך ורק לקביעות המינים – תרמו לירידת קרנה של תורת הבריאה הספונטנית לפחות כמו רדי וספאלאנצאני בניסוייהם. וקובינה, שניפץ את המיתוס העתיק על שרשרת היצורים החיים, תרם לתיאוריית האבולוציה אולי אף יותר משעשה לאמארק על־ידי ההכללה של הטרונספורמיזם של המאה ה-18.

בביולוגיה יש מספר רב של הכללות, אבל תיאוריות ספורות למדי. מבין תיאוריות אלה, אין ספק שתיאוריית האבולוציה היא החשובה מכולן, משום שהיא מקבצת ממקורות שונים ביותר שפע של תצפיות, אשר אילולא היא היו נשארות מבודדות; מאחר שהיא מאחדת את כל המקצועות העוסקים ביצורים חיים; מאחר שהיא משליטה סדר במיגוון העצום של אורגניזמים, וקושרת אותם היטב לשאר כדור־הארץ; בקיצור, מאחר שהיא נותנת הסבר סיבתי לעולם־החיי ולרבגוניות שלו. בעיקרו של דבר, ניתן לסכם את תיאוריית האבולוציה בשני משפטים: ראשית, כל האורגניזמים – בעבר, בהווה או בעתיד – הם צאצאים של מערכת חיה אחת או של כמה מערכות נדירות שהופיעו באופן ספונטני; שנית, מינים נגזרים אלה מאלה בתהליך של ברירה טבעית בקרב המולידים הטובים ביותר. תיאוריית האבולוציה כתיאוריה מדעית לוקה בחיסרון הגרוע מכול: מאחר שהיא מבוססת על היסטוריה, אי־אפשר

לאמתה בכל דרך שהיא. ובכל זאת, שלא כמו מאגיה ודת, יש לה אופי מדעי מפני שהיא פתוחה תמיד לסתירה על־ידי עדות ניסויית. עצם הניסוח של תיאוריה זו, משמעו, שהיא מסתכנת בכך, שבאחד הימים תצפית מדעית כלשהי עלולה לסתור אותה. אולם עד היום, מרבית ההכללות שערכה הביולוגיה רק משקפות ומאשרות היבטים מסוימים של תיאוריית האבולוציה. הדבר נכון במיוחד עבור סדרה שלמה של משפטים, כמו: כל היצורים החיים בנויים מתאים; כל היצורים החיים מנצלים את אותם איזומרים אופטיים; המידע הגנטי של אורגניזם מוכל בחומצה דאוקסיריבונוקליאית (DNA); יצור חי משיג את האנרגיה הדרושה לו על־ידי ריאקציות, שבמהלכן מצומדים זירחונים לניצול של תרכובת כימית או של אור. במאה ה-20 הצביעו הפיסיולוגיה והביוכימיה בעיקר על אחדותם של ההרכב והתיפקוד בעולם־החי. מעל ומעבר לרבגוניות הצורות ולמיגוון הביצועים, כל האורגניזמים משתמשים באותם חומרים כדי לבצע ריאקציות דומות, כאילו עולם־החי כולו השתמש תמיד באותם חומרים ובאותם מתכונים; המקוריות מתבטאת בבישול ובתיבול. חייבים להודות, כי משעה שמצא הטבע את המתכון הטוב ביותר, הוא התמיד להשתמש בו בכל שלבי האבולוציה. כל ביולוג בימינו – יהיה תחום ההתמחות שלו אשר יהיה: אורגניזמים, תאים או מולקולות – צריך במוקדם או במאוחר לפרש את תוצאות מחקריו לאור תיאוריית האבולוציה. תיאוריות ביולוגיות אחרות, כמו תיאוריית ההולכה בעצב או תיאוריית התורשה הן בדרך־כלל פשוטות ביותר וכרוכה בהן מידה קטנה של הפשטה. גם כשמופיעה ישות מופשטת כמו גן, לא ינوح הביולוג ולא ישקוט עד אשר יחליפו ברכיביו החומריים, חלקיקים או מולקולות; הרי זה כאילו כל תיאוריה ביולוגית, במידה שהיא רוצה להתקיים בכלל, חייבת להתבסס על מודל מוחשי.

מה שהביא, אולי יותר מכול, למהפך הגדול בחקר היצורים החיים היא העובדה, שמושאים חדשים נעשו נגישים לניתוח – לא תמיד בעקבות הופעתה של טכניקה חדשה, שהגבירה את רגישות המכשור, אלא לעתים קרובות שינוי באופן ההתבוננות באורגניזם, בדיקתו וניסוח שאלות שתצפיות צריכות לתת להם תשובה. אכן, לפעמים שינוי פשוט בתאורה מסיר מכשול, או מאיר היבט כלשהו

במושא החקירה, או קשר שהיה עד אז סמוי מן העין. אולם בשלהי המאה ה-18 לא נדרש שום מכשיר חדש להשוואת רגל של סוס עם רגל של אדם ולהסיק מסקנות שיש דמיון במבנה ובתיפקוד של שתיהן. איזמל המנתחים שהיה בידיו של פֶּרְנֶל, שטבע את המושג פיסיולוגיה, לא היה שונה מאוד בצורתו ובאיכותו מזה שהיה בידיו של הארווי, שאיפשר עריכת ניסויים במחזור־הדם. מבין כל אלה שתקרו את התורשה במאה ה-19 ועד ימיו של מנדל, לא היו אלא הבדלים קטנים בבחירת מושאי הניסויים, במה שנבדק, ומעל לכול – במה שהתעלמו ממנו. למעלה משלושים שנה התעלמו מעבודתו של מנדל, משום שהן אנשי מקצוע שונים, כגון ביולוגים ומגדלי עדרים, והן מטפחים של זני צמחים, עדיין לא היו מוכנים לאמץ את גישתו המדעית. 'אלה המחפשים את אלוהים – מוצאים אותו', אמר פסקל; אבל הם מוצאים רק את האלוהים שאותו הם מחפשים.

אפילו הופעתו הפתאומית של מכשיר המגדיל את כוח האבחנה של החושים לעולם איננה אלא יישום מעשי של מושג מופשט. המיקרוסקופ הוא שימוש מחודש בתיאוריות פסיקליות בתחום האור. יתרה מזו, לא די 'לראות' גוף שלא נראה עד כה, כדי לעשותו מושא הניתוח. כשבחן לְבָנְהוּק לראשונה טיפת מים דרך המיקרוסקופ, הוא גילה עולם בלתי־ידוע: צורות שורצות, יצורים חיים, שפע של פאונה בלתי־צפויה, שבזכות המכשיר נעשתה לפתע נגישה לתצפית. ובכל זאת, מחשבת התקופה לא ידעה מהי משמעותו של עולם זה: היא לא ידעה איזו תועלת היא יכולה להפיק מהיצורים המיקרוסקופיים האלה, וגם לא עמדה לרשותה דרך לקשר אותם לשאר עולם־החי. תגלית זו סיפקה נושא שיחה, ותו לא. העובדה שיצורים אלה – כה קטנים עד שהעין איננה יכולה להבחין בהם – יכולים לחיות ולנוע, היתה הוכחה נוספת (אם היה צריך בזה כלל) לכוחו ולנדיבותו של הטבע: נושא שיחה משעשע בחצרות המלכים ובטרקלינים, שרכילות בנושאים מדעיים מעניינת אותם, ונושא לשערוריה עבור אנשים כבופון, שראו ביצורים מיקרוסרופיים אלה עלבון צורב לעולם־החי כולו. לדידם, היה משום עלבון לכל הברואים, ובמיוחד לאצילים שבהם, שטיפת מים יכולה להכיל אלפי יצורים חיים. באותה תקופה, כשהסתכל רוברט הוק בחתיכת שעם דרך המיקרוסקופ, הוא הבחין בצורות

הדומות לחלת־דבש, וכינה אותן בשם תאים. מאלפִיגי ואחרים גילו צורות דומות בחתכים של איברי צמחים מסוימים. אולם הם לא היו מסוגלים להסיק את המסקנה הפשוטה ביותר בדבר מבנה הצמחים. בשלהי המאה ה-17 עדיין עסקו בחקירת המבנה הנראה של היצורים החיים, ולא בפירוקם לתת־יחידות. התחום היחידי שבו היתה המחשבה מוכנה לקבל את מה שגילה המיקרוסקופ היה תחום הגנרציה. עד אז היו האירועים המלווים את עירוב הזרע ואת התפתחות הביצית נסתרים מעין האדם בשל העדר מכשיר רגיש דיו. לפיכך, כשהבחינו לבנהוק והרטסוקר ב'יצורונים' (animalcules) השוחים סחור־סחור כמטורפים בנוזל הספרמטי של זכרים מקרב בעלי־החיים שונים, מיד מצאו שימוש עבורם – אך לא השימוש הנכון. במשך עשרות שנים ניסו חוקרי־טבע להפוך את היצורונים האלה לבעלי־המלאכה היחידים של הגנרציה, או לצמצם את תפקידם ולעשותם צופים מן הצד. כדי שמושא כלשהו יהיה נגיש למחקר, לא די שנבחין בו, אלא גם חייבת להיות בשטח תיאוריה המוכנה לבוא לעזרתו. בדו־שיח בין תיאוריה לניסוי, המלה הראשונה נתונה תמיד לתיאוריה. היא הקובעת את צורת השאלה, ובכך מציבה גבולות לתשובה. וכבר אמר פסטור, ש'הזדמנות נופלת תמיד בחלקה של המחשבה המוכנה מראש'. 'הזדמנות' כאן, משמע: תצפית שנוערה במקרה ולא כדי לאמת תיאוריה. אולם התיאוריה שאיפשרה לפרש את המקרה כבר היתה מוכנה ומזומנה.

כמו שאר מדעי־הטבע, הביולוגיה בימינו איבדה רבות מאשליותיה. כבר אין היא מחפשת אחר האמת, אלא בונה את האמת שלה. המציאות נראית כשיווי־משקל שלעולם איננו יציב. בחקר היצורים החיים, ההיסטוריה מציגה עדות של רצף תנודות, תנועה של מטוטלת, הנעה הלך ושוב בין הרצוף לבלתי־רצוף, בין המבנה לתפקוד, בין זהות התופעות לרבגוניות היצורים. מתנודות אלו מתבהרת בהדרגה הארכיטקטורה של החיים, המתגלה בשכבות עמוקות יותר מתמיד. בעולם־החי, כבמקומות אחרים, עולה תמיד הקביעה: 'הסבר את הנראה המסובך על־ידי הבלתי־נראה הפשוט', כהגדרתו של ז'אן פֶּראן. אבל ביצורים, כמו בדברים, יש גלגלים בתוך גלגלים. אין ארגון אחד של החי, אלא סדרה של ארגונים המתאימים זה לזה כבובות רוסיות. בתוך כל פרטי־יחיד תבוי

פרטייחיד אחר. מעבר לכל מבנה הנגיש לניתוח, מתגלה עוד מבנה, מסדר גבוה יותר, המשלב בתוכו את הראשון ונותן לו את תכונותיו. אל המבנה השני אפשר להגיע רק על-ידי הסרת הראשון, על-ידי פירוק האורגניזם והרכבתו מחדש על-פי חוקים אחרים. כל רמת ארגון שהתגלתה באופן זה מוליכה לדרך הסתכלות חדשה בהיווצרותם של היצורים החיים. מאז המאה ה-16 ואילך התגלה ארגון חדש בארבע הזדמנויות שונות, בכל פעם מבנה מסדר גבוה יותר: תחילה, במאה ה-17 התגלה הסידור של שטחי-הפנים הנראים, היכול להיקרא מבנה מסדר ראשון. בשלהי המאה ה-18 התגלה ארגון, מבנה מסדר שני, המצוי בתשתיתם של איברים ותיפקודים, שהתפענוח לבסוף כתאים. בתחילת המאה ה-20 התגלו הכרומוזומים והגנים, מבנה מסדר שלישי, החבוי בלב התא; ולבסוף, באמצע המאה ה-20, התגלתה המולקולה של חומצת-הגרעין, מבנה מסדר רביעי, הנחשב היום לבסיסו של כל אורגניזם, של תכונותיו ושל תמידותו במהלך הדורות. כל אחד מהמבנים האלה היווה, בתורו, את מוקד המחקר של היצורים החיים.

ספר זה מנסה לתאר את התנאים שאיפשרו לגלות את המבנים האלה, זה אחר זה, מאז המאה ה-16: מדובר בדרך שבה הפכה 'גנרציה', בריאה חדשה בכל פעם הדורשת תמיד התערבות של כוח חיצוני כלשהו, ל'התרבות', תכונה פנימית של כל מערכת חיה; זוהי הנגישות למושאים חבויים כמו תאים, גנים, מולקולות של חומצת-גרעין. גילוייה של כל בובה רוסית, ההצגה של רמות עוקבות אלה, איננה אך ורק תוצאה של צבירת תצפיות וניסויים. בעיקרו של דבר, היא מבטאת שינוי עמוק יותר, דרך הסתכלות חדשה באובייקטים, תמורה בעצם טבעו של הידע.

המבנה הנראה

בספרו *Des Monstres et Prodiges*, שהשלים את מסתו על הגנרציה, העיר אֶמְבְּרוּאֶז פֶּאֶרְה ב-1573: 'הטבע מנסה תמיד לברוא את הדומה לו: פעם נראָה שה בעל ראש חזיר, משום שחזיר־בר עלה על הכבשה.¹ מה שמפתיע אותנו כיום במשפט זה איננו בראש ובראשונה הרעיון בדבר מפלצת שמתמזגות בה תכונות אופייניות של מינים שונים; כל אחד יכול לדמיין לעצמו או לשרטט דבר מעין זה. גם אופן יצירת המפלצת איננו מפתיע אותנו; משעה שהתקבלה האפשרות של שחלוף צורות ואיברים בין בעלי־חיים, הזדווגות היא כמדומה הדרך הפשוטה ביותר ליצירת בן־כלאיים כזה. אולם מה שבאמת חורג כאן לטעמנו, הרי זה הטיעון שפֶּאֶרְה משתמש בו במשפט זה. כדי להדגים דבר שבימינו נחשב לאחת מתופעות הטבע הרגילות ביותר – היווצרותו של צאצא בדמות הוריו – הוא מציג לפנינו מראָה של משהו שלדעתנו איננו אפשרי; משהו שבעינינו איננו תואם את עצם סדירותה של התופעה הזאת. חבל שאין פֶּאֶרְה מספר לנו, איך נראו צאצאי השה בעל ראש החזיר. אין בספרו דבר היכול ללמדנו אם גם הוא הוליד צאצאים בעלי ראש חזיר.

באותם ימים אף לא העלו על הדעת שתופעות טבעיות, הגנרציה של בעלי־החיים ממש כמו תנועתם של גרמי השמים, עשויות להיות גשלוטות על־ידי חוקים. לא נעשתה כל הבחנה בין כורח התופעות ובין אקראיות האירועים. אמנם ברור היה, שסוס נולד מסוס וחתול מחתול, אך לא היה זה תוצא של מנגנון, שאיפשר

ליצורים חיים ליצור עותקים של עצמם, ממש כמו שמכונת־דפוס יוצרת עותקים של טקסט. רק לקראת שלהי המאה ה-18 הופיעו המלה והמושג 'רבייה' ושימשו לתיאור היווצרותם של אורגניזמים חיים. עד לאותם ימים, יצורים חיים לא התרבו, הם פשוט נולדו. הגנרציה היתה תמיד תוצאה של בריאה, אשר בשלב זה או אחר הצריכה התערבות ישירה של כוחות עליונים. כדי להסביר את התקיימותם של המבנים הנראים על־ידי צאצאות (filiation), אנשי המאה ה-17 ייחסו את היווצרות כל הפרטים הנמנים עם אותו מין לסדרה של בריאות (creations) סימולטניות שהתבצעו על אותו מודל בראשיתו של העולם. מרגע שנבראו, כל היצורים העתידיים המתינו ללידתם, מוגנים מכל פנטזיה ומכל אי־סדירות. אולם עד המאה ה-17, היווצרותו של יצור היתה תלויה אך ורק ברצונו של הבורא. לא היו לו כל שורשים בעבר. הגנרציה של כל צמח וכל בעל־חיים היתה במידת־מה אירוע יחודי, מבודד, שאיננו תלוי בשום בריאה אחרת, בדומה ליצירה של חפץ או של עבודת אמנות בידי האדם.

גנרציה

מן העת העתיקה ועד הרנסנס כמעט לא השתנה הידע על עולם־החי. כאשר קארדנו, פֶּרְנָל או אֶלְדֵּרוֹבאָדוּס דנים ביצורים, הריהם חוזרים פחות או יותר על מה שכבר אמרו אריסטו, היפוקראטס וגאלנוס. במאה ה-16 ניתן היה לתאר כל גוף בעולמנו, כל צמח וכל בעל־חיים כצירוף מסוים של חומר ושל צורה. החומר מורכב תמיד מאותם ארבעה יסודות. רק הצורה אופיינית איפוא לגוף. לדעת פרנל, כשדבר נברא, הצורה היא הנבראת.² כשהדבר נכחד, רק הצורה נעלמת, לא החומר. שהרי אילו היה החומר עצמו מתכלה, העולם גם הוא היה נעלם זה כבר; הוא היה מתבזבז. הטבע הוא הנותן צורה לחומר, כדי לברוא כוכבים, אבנים או יצורים חיים. אולם הטבע הוא רק 'שליח' מבצע, עיקרון הפועל תחת הדרכת האל. כשאנחנו רואים כנסיה או פסל, אנחנו יודעים כמובן שארכיטקט או פֶּסֶל, בימינו או בעבר, יצרו אותם. וכך, כשאנחנו רואים נהר, עץ או ציפור, אנחנו יודעים שקיים כוח בורא עליון

שיצר אותם, תבונה אשר התליטה ליצור עולם, ומאז היא מארגנת אותו, דואגת שיתפקד כהלכה, ומכוונת אותו בהתמדה.

ל'דומה' שנוזקק לו אמברואז פארה כדי להסביר את היווצרותו של שה בעל ראש חזיר, לא היה אותו מעמד שיש לו בימינו. באותם ימים, כדי לדעת מושאים שונים, צריך היה לגלות סימנים נראים שהטבע הציב על שטח־הפנים שלהם, ולאפשר לאדם להבין את היחסים ביניהם. הוא צריך היה להבחין במערכת קווי־דמיון, רשת האנלוגיות וקווי־הדמיות המאפשרת גישה לסודות טבע מסוימים. שכן, כפי שאמר פּוֹרְטָה: 'ניתן ללמוד על כוונות האל על־פי הדמיות שבין הדברים.'³ כדי לדעת מושא, אין להתעלם אפילו מאנלוגיה אחת המקשרת אותו לדברים וליצורים. יש צמחים הדומים לשערות, עיניים, חגבים, תרנגולות, צפרדעים או נחשים. החיות משתקפות בכוכבים, בצמחים, ובאבנים, שבהן, אמר פִּירְ בֶּלֶן, 'הטבע נהנה לצור צורה של דגים יותר מאשר כל בעלי־החיים האחרים'.⁴ יתרה מזו, קווי־דמיון, שקשה במיוחד לגלותם, נושאים סימן: הם חתומים. החתימות עוזרות לגלות את האנלוגיות, אשר אחרת עלולות היו לחמוק מתשומת־הלב. בזכות קווי־הדמיות והחתימות ניתן לעבור מעולם של צורות לעולם של כוחות. פאראצלסוס אמר, שבאמצעות האנלוגיות, 'הבלתי־נראה הופך לנראה'.⁵ שכן, אין קווי־הדמיון משוללי־תועלת או משוללי־הצדקה; אין הם סתם ביטוי של שעשוע אלוהי. מאחר שגופים מסוימים ניחנים בתכונות מסוימות, הם דומים זה לזה. ולהיפך, הדמיות מבטאת שותפות בתכונה. אם צמח דומה לעיניים, דבר זה מסמן שהוא צריך לשמש לטיפול במחלות עיניים. מעבר לדמיות מסתתר טבע הדברים. לפיכך, העובדה שילד דומה להוריו איננה אלא היבט מיוחד של כל הדברים הקושרים באופן סודי יצורים ודברים זה לזה.

הסדר הטבוע ביצור החי איננו שונה איפוא מהסדר השורר ביקום. הכול הוא הטבע, והטבע הוא אחד, כפי שמפרט הקטע הבא, שפאראצלסוס הקדיש לרופאים.

הרופא צריך לדעת מה מועיל ומה מזיק ליצורים חסרי־דגש, למפלצות־ים

ולדגים; מה נעים ומה שגוא על בעלי־חיים משוללית־בונה; מה מועיל ומה מזיק להם. זה מה שהוא חייב ללמוד על־אודות הטבע. מה עוד? עוצמתן של נוסחאות מאגיות, מוצאן ומקורן, טבען; מי היא מְלוּזִינָה; מי היא הסירנה; מה הם חילוף, השתלה ושינוי; איך לתפוש אותם ואיך להבין אותם באופן מושלם; מה עולה בכוחו על הטבע, על המינים, על החיים; טבעו של הנראה ושל הבלתי־נראה, של המתוק והמר; למה יש טעם טוב; מהו מוות; במה משתמשים הדייג, מעבד העורות, צובע העורות, צובע הבדים, הנפח, מגלף העץ; מה נמצא במטבח, במרתף, בגן; מה שייך למזג־האוויר, לאמנות הצייד, ולמלאכת הכורה; לחיי הנווד ולאוהב הבית, לצורכי האיזור הכפרי ולסיבות השלום; לתחום התעניינותם של האדם הרגיל ושל איש הכמורה; לעיסוקיהן ולטבען של מדינות שונות, מקורן; לטבעם של אלוהים ושל השטן; לרעל ולסם־נגדי; לטבע הנשי ולטבע הגברי; מהו ההבדל בין נשים לבתולות, בין צהוב לצהוב־בהיר; מה זה לבן, שחור, ארגמן ואפור; הסיבה לריבוי הצבעים, לקצר ולארוך, להצלחה ולכישלון; וכיצד להשיג את כל התוצאות האלה.⁶

אם כן, לא ניתן היה לצמצם יצור חי למבנה הנראה בלבד. הוא ייצג חוליה ברשת סודית המאחדת את כל האובייקטים בעולם. כל בעלי־חיים, כל צמח נחשבו למעין גוף הפכפך – גוף הלובש צורה ופושט צורה, המתפשט לא רק לעבר יצורים אחרים, אלא גם לאבנים, לכוכבים ואפילו לפעילויות אנוש. צריך היה לראותו לא רק כפי שהוא במציאות, אלא גם במטבח, בשמים, על שלטי האבירים, לנגד עיניהם של הרוקח, צובע העורות, הדייג והצייד. כשדן אלדרובאנדוס בסוס, הוא מתאר את צורתו והופעתו בארבעה עמודים, אולם הוא נזקק לכ-300 עמודים כדי לתאר בפרוטרוט את שמות הסוס ונושאים מגוונים הקשורים בו: רביה, בית־גידול, מזג, צייתנות, זיכרון, חיבה, הכרת־תודה, גאמנות, נדיבות, להט לַנְצָח, מהירות, עירנות, פוריות, נטיות, מחלות והטיפול בהן; לאחר מכן הוא דן בסוסי מפלצת, סוסי ענק, סוסים אגדיים, סוסים מפורסמים, יחד עם תיאור המקומות שבהם זכו בתהילתם. תפקיד הסוסים באמנות הרכיבה, בצייד, במלחמה, במשחקי ציד, בעבודת אדמה ובתהלכות. חשיבות הסוס בהיסטוריה, במיתולוגיה, בספרות, במשלים, בציור ובפיסול, על מדליות, על סמלי האצולה ועל מגיני האבירים.

באותה תקופה לא ניתן היה לסדר את עולם־החי לפי קריטריונים של צורות בלבד. הצבת היצורים נעשתה ברמה שונה, לפי פיצול שונה של הידע. הכול נראה רציף בטבע, ערוך לפי הירארכיה ולא דווקא קטגוריות. היתה כמובן החלוקה הישנה של אריסטו, היינו, שיצורים חיים מובחנים ממינרלים על־פי הבדלים בולטים שרק הנפש יכולה להסבירם. ואילו בין היצורים החיים נערכת הבחנה בין הצמחים, בעלי־החיים ובני־האדם, אשר איכויותיהם השונות תואמות לסוגי הנפשות השונות שהאל העניק להם. אבל בהירארכיה של היצורים, ההתקדמות אירעה בשלבים שקשה להבחין בהם. בקרב צורות שגלשו זו על פני זו, התקשו מאוד להחליט, היכן מתחיל תחום והיכן הוא מסתיים. מי יכול לומר אם ספוג הוא צמח או בעל־חיים? האם אלמוג הוא אכן סלע? 'כשם שזואופיטים דומים גם לבעלי־חיים וגם לצמחים', אמר צסאלפינוס, 'כן פטריות נמנות עם צמחים ועם דברים דוממים.'⁷ למעשה, החלוקה היחידה שהמאה ה-16 לא היססה לערוך בעולם־החי היתה זו שבין האדם ל'חיות הבר'. ההבחנה בין הצמח לבעל־החיים יכולה היתה להיעשות רק באיזור המעטפת, שבה העדות על ההבדלים היטשטשה על־ידי חשיבות האנלוגיות. 'כל חלקיהם של הצמחים', אמר קארדנו, 'מתאימים לחלקיהם של בעלי־החיים: שורשים דומים לפה, החלקים התחתונים של הגזע דומים לבטן, עלים לשיער, קליפת העץ לעור, עֵצָה לעצמות, ורידים לוורידים, עצבים לעצבים, מטריקס לקרביים.'⁸ המשחק של קווי־הדמיון מטשטש את הדיוקנאות וממלא את הפערים. הצמח הופך לבעל־חיים מהופך, שראשו כלפי מטה. צסאלפינוס ממקם את הלב, מִשְׁכַּן הנפש, במקום שלדעתנו יש סיבה טובה ביותר למקם את העיקרון הוויטלי... בחלקו התחתון של הצמח, במקום שהגבעול מתחבר לשורש'.⁹

בתוך סבך זה של צורות לא היה מקום למינים, כפי שהבינו אותם בתקופה הקלאסית – המאות ה-17 וה-18 – כלומר, התמד המבנים הנראים על־ידי צאצאות. יצירת הדומה על־ידי גופים חיים לא ביטאה כורח של הטבע. כדי להסביר את היווצרותו של יצור, צריכים היו להזדקק כל פעם למעשהו של האל או של שליחיו. בריאתו של יצור, כמו בריאתו של כל דבר אחר, דורשת איחוד של

החומר ושל הצורה. אולם תכונותיהם של יצורים חיים דורשות גם את התערבותם הישירה של כוחות השולטים בעולם. החיבור הזה מובטח על-ידי שני מתווכים. ראשית, הנפש, המיוחדת לכל פרט-יחיד ואיכותה נקבעת על-פי מקומו של פרט זה בהירארכיית היצורים, ואינה נתפשת על-ידי החושים. שנית, חוס פנימי, המשותף לכל היצורים החיים, ונתפש על-ידי החושים.

באותם ימים נזקקו לנפש כדי להסביר את תכונותיהם של יצורים חיים, כפי שהיום נזקקים לחשמל כדי להסביר סערת רעמים וברקים. הרגע החשוב ביותר בגרציה היה איפוא השתלת הנפש בחומר של הגוף. זה היה האירוע הטבעי ביותר, או, כפי שהיינו אומרים היום, האירוע הביולוגי *par excellence*. ואילו החוס הפנימי היה האות של החיים עצמם. כשאירע מוות, החוס התפוגג והגוף התקרר, אם כי שמר זמן-מה על צורתו. 'אנחנו מזהים את ידידנו,' אמר פרנל, 'אף-על-פי שכבר אין חיים בו, כבר אין חוס בו. החוס הפנימי פרח.¹⁰ חוס זה שכן בכל היצורים החיים, אפילו 'בנחש, אם כי מזגו קר', אפילו 'בדודא ובפרג ובכל שאר הצמחים בעלי המזג הקר'.¹¹

הבורא מיקם את החוס הזה, מקור כל החיים, בשני אתרים. הוא מיקם אותו בבעלי-החיים ובצמחים, שניחנו ביכולת להוליד את בני דמותם – ובאופן מוגדר יותר, בזרעו של הזכר, היכול לשפעל את החומר המצוי בזרע של הנקבה ולתת לו צורה. לפיכך, ציין מונטיין, 'אנחנו רואים שנשים בודדות יולדות תמיד גושי בשר חסרי-צורה, אף-על-פי שיחד עם סוג זרע אחר היו יכולות להביא לעולם ולדות טובים וטבעיים.¹² והבורא מיקם את החוס בשמש, אשר חומה יכול לשפעל ישירות את היסודות, את האדמה, את המים, וכל מיני פסולת להולדת יצורים דוחים – 'נחשים, חגבים, שלשולים, זבובים, עכברים, עטלפים, חפרפרות, וכל דבר הנולד באופן ספונטני שלא מזרע, אלא מחומר רקוב ומטינופת', כדברי פרנל.¹³ בעיני אנשי המאה ה-16, בריאה ספונטנית היתה טבעית ומובנת לפחות כמו גרציה על-ידי זרע, אם לא יותר מכך. רק היותן של הצורות מושלמות יכולה להצדיק את מורכבות התהליכים. 'הטבע היה יוצר את כל בעלי-החיים מחומר רקוב בגרציה,' אמר קארדנו,

אבל מאחר שהיצורים המושלמים זקוקים לזמן רב להשלמתם, החומר לא יכול היה להישמר זמן רב ללא תנועה ובעיקר ללא כלי קיבול כלשהו, בגלל שינויי מזג-האוויר; מסיבות אלה, החומר היה דרוש במקום שנמצאו המעטפת של הביצית או של הפרי ויכלו לשמור עליו עד שהוא נעשה מושלם, ולפיכך מתבצעת הגנרציה על-ידי זריעת זרע.¹⁴

כדי לתאר גנרציה השתמשו אנשי המאה ה-16 בדימויים ולא דווקא במודלים שהושאלו משתי פעילויות יצירתיות של האדם: אלכימיה ואמנות. השימוש בתום כדי לחולל שינוי בחומר הוא שיטתו העיקרית של האלכימאי. כשחיפשו ציורפים חדשים של כספית, גופרית ומלחת, היה זה בחומם של התנורים ושל האביקים. או, כאשר ריקבון הפך את הבשר למסה של זבובים, היה זה בעזרת החום שהוא חולל. ושוב, כשנוצר זרעם של בעלי-החיים המושלמים, הדבר נעשה בזכות תומו של הגוף. החומר והרוחות השוכנות בו ולושו, נטחנו ונשלחו מהלב אל הכבד, מהכבד אל המוח, מהמוח לאשכים 'בדרך פתלתלה ועקלקלה בדומה לקנוקנות המתפתלות של הגפן', הסביר פארה.¹⁵ עם התקדמותם דרך 'הפיתולים והעיקולים של הגוף' סיפחו הליחות והזרע את כל הסגולות הנחוצות להם לעבודתם בעתיד: אביונה, התגרמות, התבשרות, התעצבות והתוורדות. משחקם של כוחות בלתי-ידועים היה חבוי מאחרי משחקה של השפה. בזכותן של מלים התגלה לבסוף במקצת המיסתורין של הטבע, שכן כמה מהסגולות שציינו החוקרים הוכלו במלים עצמן. אמירת המלים או כתיבתן, כבר הן עצמן היו התקרבות-מה אל סודותיהן החבויים, כשם שההבחנה בקווי-הדמיות פתחה את הדרך לידיעת הדברים. אולם, בסופו של דבר, 'הורים אינם אלא מקום מושבם של הכוחות המאחדים את החומר ואת הצורה', ציין פֶרְנֶל. 'מעליהם ניצב ה"יוצר", הכול-יכול, הוא הקובע את הצורה בכך שהוא נופח בה רוח חיים.¹⁶ יצירתו של יצור בידי הכוחות המנהלים את היקום דומה ליצירתם של חפצים בידי האדם. הטבע, מצויד בכל כוחותיו, עובד 'כמו ארכיטקטים, בנאים ונגרים, אשר, לאחר שהניחו את היסודות של בית או בנו גוף של אוניה, מקימים את שאר המבנה'.¹⁷ או כמו 'פסל המחלץ את הצורה מתוך הברוזה או האבן'.¹⁸ או אפילו כמו 'צייר המצייר מהטבע'.¹⁹ דיוקן זה שנעשה לפי הטבע הוא האחראי

לקווי־הדמיון בין הורים לילדים, ובאמצעותו חדרה התורשה לרשת האנלוגיות וקווי־הדמיות. התורשה ייצגה כביכול את חלקו של האמן, את התערובת של צורה, מבנה ומזג, אך לא את החומר, אשר שב והופיע, מדור לדור, באמצעות הזרע. 'האין זה מדהים', ציין מונטיין,

שטיפת הזרע, שממנה נוצרנו, נושאת בחובה לא רק את הרשמים של צורת הגוף, אלא גם של המחשבות והנטייות של הורינו? היכן יכולה טיפת נוזל זו לשאת מספר אינסופי כזה של צורות? ואיך הן מעבירות את קווי־הדמיון האלה, שהדרך שהם מתקדמים בה היא כה פתלתלה ובלתי־סדירה, באופן שהגין דומה לסבו והאחיין לדודו.²⁰

ואולם הדיוקן שנעשה לפי הטבע נתון היה תמיד להשפעתם של כוחות שונים, היכולים לפעול על העובר במשך התפתחותו; 'הדברים שהאשה מדמינת', אמר פאראצלסוס, 'דומים לכוח אלוהי, ותשוקותיו החיצוניות של דמיון זה מוטבעות בילד'.²¹ לאחר זה, הכול נעשה אפשרי. כל החזונות, החלומות והרשמים יכולים לעשות את דרכם אל הילד המצוי ברחם אמו. כל הרגשה של ההורה יכולה להשתקף בילד, להטביע בו את סימנה, להשאיר את חתימתה. 'אם מכסים בבד לבן טווסה היושבת על ביציה', הכריז פֶּרְנֶל, 'יבקעו צאצאים לבנים ולא רבגוניים. באופן דומה, תרנגולת תביא לעולם אפרוחים בעלי צבעים שונים, אם היא יושבת על ביצים שנוצבעו בצבעים שונים... דברים אלה אושרו בתצפיות של כמה אנשים'.²²

וכך, ביצירה של יצורים מושלמים, המולידים את הדומה להם, נכפלת רשת קווי־הדמיות. מצד אחד, יצירה־מחדש של צורה ומזג מובטחת על־ידי התורשה; ומצד אחר, באמצעות התחושות שקולטים ההורים או באמצעות הדברים שהם מדמינים, תוצר הגנרציה נגיש להשפעות העולם החיצוני, היכול להטביע בילד את חתימתן של כל האנלוגיות האפשריות. הגלגל משלים סיבוב מלא במשחק־הגומלין של קווי־הדמיות. מדוע לא ישתקף הילד ביקום – והרי היקום כבר משתקף בילד בטרם נולד? בדרכים עקיפות מעין אלה, הכוחות הבלתי־נראים משקפים שוב ושוב, עד לאין־סוף, את

קווי־הדמיון שבין היצורים, וכל צירופי הצורות נעשים אפשריים: האיברים, הגפיים, והתוספות האחרות של כל היצורים החיים יכולים להסתדר־מחדש זה עם זה. המעבר מהווריאציות הקלות, האנומליות המזעריות, המבטאות כמה טעויות חסרות־ערך, ועד ערבוב חלקיהם של יצורים חיים שונים באביק והחלפה ביניהם, כדי ליצור מפלצות – הוא כמעט בלתי־נתפש. ניתן למצוא את כל צורות הביניים בין גידול שיש לו 'צורה של דובדבן, שזיף, קרן או תאנה',²³ ובין 'סוסה הממליטה סייח בעל פני אדם'.²⁴

בתיאור עולם־החי בכתבים של המאה ה-16 יש שפע של כל מיני מפלצות. אלדרובאנדוס ואמברואז פארה הקדישו להן ספרים שלמים, שבכל אחד מהם יש 'היסטוריה' של יצורים חיים, של ציפורים או של דגים; ויצורים אגדיים דרים שם בכפיפה אחת עם יצורים רגילים. מפלצות אלה משקפות תמיד את המוכר. אף אחת איננה דומה למשהו שאיננו קיים, אף אחת איננה שונה לגמרי ממה שאפשר לראות פה ושם. אולם אין הן דומות ליצור יחיד אחד, אלא בעת ובעונה אחת לשני יצורים, שלושה או יותר. חלקיהן מתאימים לאלה של בעלי־חיים שונים: 'מפלצת בעלת ראש דוב וזרועות קוף', 'אדם בעל ידיים ורגליים של שור', 'ילד בעל פני צפרדע', 'כלב שפניו דומים לפני תרנגולת', 'אריה המכוסה בקשקשי דג', 'דג בעל ראש של בישוף', וכל מיני צירופים אחרים שניתן רק להעלות על הדעת. המפלצות דומות תמיד למשהו, אך אלה קווי־דמיון מעוותים ואין הם תואמים לפעולתו הרגילה של הטבע. הצירופים והסימנים שניתן לפענחם אינם מבטאים עוד את סדר העולם, אלא מהווים עדות לטעויות העשויות להחליק פנימה. 'מפלצות הן דברים המופיעים בניגוד לדרך הטבע',²⁵ קבע אמברואז פארה. בניגוד לדרך הטבע, אך לא לכוחות הטבע, שכן הטבע איננו שוגה. אף־על־פי שאנשים, בעלי־חיים או אפילו צמחים שוגים לפעמים, ואף־על־פי שאנחנו נתקלים בשגיאות גופניות ומוסריות, לעולם אין שגיאות שניתן ליחסן לעקרונות, שהרי עקרונות מוציאים אל הפועל בנחישות את הכוונות העליונות. 'מה שאנחנו מכנים מפלצות', הסביר מונטיין, 'אין הן כאלה לדידו של אלוהים, הרואה במרחב האינסופי של עבודתו את אינסופיות הצורות שהוא כלל בה'.²⁶ כשנוולדת ילדה בעלת שני ראשים, או נולד גבר ועל ראשו

'נחשים חיים קטנים' במקום שיער, משמע שהיה יותר מדי זרע. לעומת זאת, אם נולד אדם ללא זרועות או ללא ראש, משמע שהיה פחות מדי זרע. אם אשה מביאה לעולם ילד בעל פני כלב, אין זו אשמתו של הטבע, מאחר שהוא 'יוצר תמיד את הדומה לו', אלא זוהי אשמת האשה, שהתמכרה למעשי חטא עם בעל-חיים. ובאשר לסטיות של הדמיון, האם יכלו להיות אלא התוצאה של מחשבת חטא? כל מפלצת היא תוצאה של חטא ומשמשת עדות לאי-סדר מסוים: פעולה (או אפילו כוונה) שאיננה בהתאמה עם סדר העולם. כל סטיה מהטבע, גופנית או אתית, יוצרת פרי לא-טבעי, כי גם לטבע יש מוסר משלו.

ידע, שהיה מבוסס על בליל של תצפיות, היפותזות, היקשים, פילוסופיה ועקרונות עתיקים ממורשת הסכולסטיציזם, המאגיה והאסטרולוגיה, נראה בימינו הטרורגני מאוד. ובכל זאת הוא הרכיב תמונה עקיבה בהחלט. כל תצפית, שהתבססה על רשמים חושיים, התאימה למשהו שלם, שבו לכל דבר ולכל יצור היה מקום כחלק אחד ברשת סודית, הארוגה בידי כוח עליון. לא ניתן היה להפריד בין ידיעת הדברים ובין אמונה. היווצרותו של יצור חי לא היתה פעולה שונה באופן בסיסי ממה שהכניס כוכב למסלול סביב כדור-הארץ. הגנרציה היתה רק אחד המתכונים שהשתמש בהם אלוהים יום-יום כדי לקיים את העולם שברא.

פענוח הטבע

בתקופה הקלאסית אמנם עדיין חשבו שבריאת יצור חי נעשית תמיד על-ידי גנרציה, אולם חל שינוי הן בתפקידה והן במעמדה של הגנרציה. בתוך פחות ממאה שנה, הגופים החיים מורקו כביכול עד שנעשו נקיים למשעי. הם התנערו משכבה של אנלוגיות, קווי-דמיות וסימנים, והופיעו במערומי צורתם החיצונית האמיתית. כבר לא ניתן היה להציב על אותה רמה את צורתו של צמח או של בעל-חיים ואת הרעיונות שמביעים על-אודותיהם הנוסעים, ההיסטוריונים והיוריסטים למיניהם. למה שנקרא בספר או נמסר על-פה כבר לא היה אותו משקל כמו למה שנראה בעין.

בתקופה זו, המבנה הנראה של יצורים חיים נהפך למושא הניתוח והסיווג. ומאחר שהמבנה הראשוני של אורגניזמים חוזר על עצמו בדרך-כלל בנאמנות מדור אחד למשנהו, גורציה כבר לא היתה האמצעי המקיים את הצורות במשך כל הזמנים ומבטיח את התמד המין. לא עוד חשבו שגורציה של יצור חי היא אירוע מבודד, יחודי ועצמאי, אלא היא הפכה לביטוי של חוק אשר הצביע על סדירות היקום.

בראשית המאה ה-17 חל מהפך בעצם טבעה של הידיעה. עד לאותם ימים, ידיעה יוחסה לאלוהים, לנפש ולקוסמוס. בתקופה הקלאסית, הבעיה כבר לא היתה הרצון לגלות את הסימנים הסודיים על הכוונות העיקריות של הטבע, אלא הרצון לחדור לתוך הטבע: הכרת התופעות הטבעיות והחוקים הקושרים אותן זו לזו, עד כמה אלה נגישים לשכלו של האדם. 'שני דברים בלבד צריכים עיון', אמר דקארט. 'אנחנו, היודעים; והמושאים עצמם, שאותם יש לדעת.'²⁷ ביחס חדש זה בין האדם לטבע, הוסט מרכז הפעילות: את רצונו של האל החליף שכלו של האדם. כבר אין שואלים כיצד נברא הטבע, אלא כיצד הוא פועל. מכאן ואילך מדעי הטבע כבר לא היו עיון, פרשנות או חידה, אלא פענוח צפנים. גליליאו אמר: 'הפילוסופיה כתובה בספר גדול הפתוח תמיד לנגד עינינו, אך לא נוכל להבינה מבלי שנטרח תחילה להבין את השפה, ונשקוד ללמוד את הסימנים המשמשים לכתיבתה.'²⁸ דקארט אמר: 'אם רצונו להבין טקסט כלשהו, שמשמעותו מוסווית על-ידי שימוש בצופן, גם אם איננו מצליחים לרדת לחקר הסדר שלפיו הוא כתוב, אנחנו ממצויאים בכל זאת סדר מדומה, כדי לבחון כל ניחוש שאנחנו עשויים להעלות על דעתנו בדבר משמעותם של אותיות בודדות, מלים או משפטים, וכדי לסדר אותם כך, שעם סיכום המימצאים נוכל לבדוק כל מה שהסקנו מהם.'²⁹ ואילו לייבניץ אמר: 'אמנות גילויים של גורמי התופעות, או היפותזות אמיתיות, הריהי כאמנות הפענוח, אשר בה ניחוש מוצלח מקצר לעתים קרובות את הדרך בהרבה.'³⁰ מכאן ואילך עסק המדע פחות ברצון האלוהי השולט ביצורים ובדברים בדרכים נעלמות, אלא התמקד בסריג שצריך היה להניח על פני הטבע, כדי לפענח את סדריו. את המצפין העליון החליף מפענח הצופן. מכאן ואילך, מה שקבע לא היה הצופן

שהשתמש בו האל בעת בריאת הטבע, אלא בעיקר הצופן שחיפש האדם כדי להבין את הטבע. ושני אלה לא היו בהכרח זהים. 'אם למשל, אמר דקארט, 'אדם הרוצה לקרוא מכתב הכתוב באותיות לטיניות, שלא נכתבו בסדר המתאים, מחליט לקרוא ב בכל פעם שהוא מוצא א-ו-ג בכל פעם שהוא מוצא ב, וכך מחליף כל אות בבאה אחריה בסדר האל"ף-בי"ת, ואם הוא מוצא שבדרך זו נוצרות מלים מסוימות בלטינית, אזי הוא לא יטיל ספק שהמשמעות האמיתית של הכתוב מוכלת במלים אלו, אף-על-פי שהוא עשוי לגלות זאת בדרך של היסק, ואף-על-פי שהכותב אולי לא סידר את האותיות בסדר זה, אלא בסדר אחר, וכך הסתיר במכתב משמעות אחרת.³¹ המשמעות המושלמת של הכתוב, הלכידות שלו, היא הקובעת את דיוק הצופן שהתגלה. באותו אופן, גם בחקירת הטבע, כוח ההסבר הוא הקובע את ערך ההיפותוזות או הגורמים המעורבים בדבר. מקורה של שיטת הפענוח הוא במערכת-מצורפת, המשמשת כלי חיוני במחקר המדעי. כדי ליצור אל"ף-בי"ת של המחשבה, כפי שביקש לייבויץ לעשות, צריך לצמצם את המורכבות לפשטות היחידות המרכיבות אותה. כשם שכל מספר נתון צריך להיחשב לתוצר של מספרים ראשוניים, כן צריך לצמצם כל פעולה לוגית לצירוף של יסודות. המערכת-המצורפת של הלוגיקה היא המראה מהו גבול האפשרי.

כל ניסיון לפענח את הטבע ולגלות את סדרו צריך היה להבטיח שהסריג לא ישתנה במהלך הפעולה. צריך היה להבטיח סדירות בתופעות הטבע. לדעת דקארט, חייבים למנוע התערבות של כוח עוין כלשהו, 'של שד שהוא מרושע, ערום וצבוע, נוסף על היותו בעל עוצמה רבה, המשתמש בכל תחבולותיו כדי להטעותני'.³² ניתן להבין את הטבע רק כהרמוניה, שבה התנהגותם של יצורים ודברים נעשית בהכרח על-פי חוקיו של משחק שמכאן ואילך לא חל בו שינוי. יתכן מאוד שאלוהים ברא את העולם; יתכן שנתן לו את הדחיפה הראשונית והחליט מה תהיה התפתחותו בעתיד. אבל מה שחשוב היום היא העובדה שאי-אפשר לשנות את ההתפתחות הזאת, שהטבע איננו משנה דבר בתוכניות שנקבעו מראש. אחרת, אין המדע אפשרי.

עד המאה ה-16, רצון האל יכול היה לממש את כל האפשרויות שהמציא הדמיון האנושי. בתקופה הקלאסית הוכפף היקום לסדירות מסוימת, לחוקים מסוימים או לקבוצות חוקים, שאף אחד – אף לא אלוהים – יכול היה לשנותם, ואשר הלוגיקה שלהם קשורה לסדר הטבע. עולם זה קיים ומתפקד, גם אם חוקי הטבע נכפו עליו מלכתחילה על-ידי צו אלוהי, גם אם מעלים על הדעת את האפשרות שקיימים עולמות אחרים הנשלטים על-ידי חוקים אחרים, גם אם התנועה מתנהלת מהכלל אל הפרט, או להיפך – הכול מאורגן, מחובר ושרוי בהרמוניה; לא מבחוק, כתוצאה של כוח סמוי שאיננו נגיש להבנתו של האדם, אלא מבפנים, על-ידי שרשרת החוקים עצמם. פענוח הטבע משמעו הגבלת הניתוח לתופעות בלבד, כדי לגלות את החוקים השולטים בהן. סיבות ראשוניות מוסטות אל הרקע על-ידי סיבות פועלות. הידיעה איננה מיוסדת עוד על דבר האל, אלא על דבר האדם.

ניתוח המושאים, יישום מוצלח של המערכת המצורפת כדי לגלות את הסדר שלהם ואת מידתם, דורש שמושאים אלה ייוצגו על-ידי מערכת סימנים. הסימן כבר איננו אות שהציב הבורא על דברים שונים, כדי לאפשר לאדם לרדת לחקר כוונותיו. הוא הפך לחלק אינטגרלי של ההבנה האנושית, הן אמצעי שפיתחה המחשבה למטרות ניתוח, והן כלי הכרחי להפעלתם של זיכרון, דמיון או רהור. מבין כל מערכות הסימנים, המתמטיקה היא בוודאי העילאית ביותר. באמצעות סמלים מתמטיים אפשר לחלק את רצף הדברים, לנתח אותם ולארגנם מחדש בצירופים שונים. לפי גלילאו, הספר הגדול של הטבע 'כתוב בשפה מתמטית, שאותיותיה הם משולשים, עיגולים וצורות גיאומטריות אחרות'.³³ במרבית התקופה הקלאסית עסק המדע רק באותם מושאים שאפשר היה לבטאם בשפה מתמטית, תחילה על-ידי יצירת יקום גיאומטרי, ואחר-כך על-ידי ייצוגו בצורה אנליטית. אבל מאוחר יותר, עם ניוטון ועם נטישתו של היקום הגיאומטרי, החישוב אמנם איבד את משמעותו המתמטית הטהורה, אולם הוא איפשר להשתמש בתוצאות התצפיות והמדידות לשם גזירת חוקי הטבע. הניתוח האלגברי של התופעות הפיסיקליות הוא שהעניק ליקום את חוק השילוב. רק הניסוח המתמטי של מדידות פיסיקליות יכול

היה להקנות אמינות להתערבות כוח מיסתורי אחר – הכבידה, שמקורו היה בלתי־ידוע, אבל החישוב של כוח זה היה דרוש כדי לקשור יחד את המכניקה של השמים ואת המכניקה של הארץ. אם מילאה הפיסיקה תפקיד מכריע במאות ה-17 וה-18, לא היה זה רק בגלל הדרך שבה תוללה שינוי ביקום והקצתה תיפקודים חדשים לתצפית, לניסוי ולהסקת מסקנות, אלא גם מפני שהיתה מדע הטבע היחידי שאפשר היה לבטאו בשפה מתמטית. בזכות הפיסיקה, אוצרי־המלים של הלוגיקה החליף את אוצרי־המלים של ההתגלות האלוהית. במקום הערפול, הדור־משמעות והפרשנות האינסופית של כתבי־הקודש, הפיסיקה כוננה את הבהירות, הדיוק והלכידות של החישוב. מגליליאו ועד ניוטון, הפיסיקה הצדיקה את נסיונה של המחשבה לכוון סדר בעולם.

החיפוש אחרי סדר, שהיה מוגבל בתחילה למושאים של המתמטיקה, הלך והתפשט לתחומים אמפיריים, אשר במבט ראשון היו כמדומה מעבר לתחומו של ניתוח מעין זה. בהדרגה, צמצום המסובך לפשוט, פתרון המורכבות הגלויה בעזרת הפשטות המצויה ביסודה, משחק המערכת־המצורפת היו ישימים גם למה שלא ניתן להימדד ישירות. סוף־סוף ניתן היה לסווג את הדברים המגוונים ביותר, את החומרים, את היצורים, ואפילו את האיכויות המעודנות ביותר. כדי להציגם בסדר, די היה, כאשר התאפשר הדבר, לקבוע את החוק הכללי שהתיר לקבץ יחד מושאים או הנחות הטרוגניים, להגדירם למחלקותיהם, ולבחון במסגרת גבולותיו של סדר זה את כל התחום שחוק זה ישים בו. דבר זה התאפשר כלאימת שנמצאה מערכת סמלים שהתאימה לייצג את המושאים האלה ולגלות את הקשרים ביניהם. שכן, כפי שאמר קוֹנְדִיאָק, גם אדם הרוצה לערוך, לעצמו בלבד, רשימה של מושאים הנמצאים סביבו, אם הוא רוצה לבצע, לעצמו בלבד, חישוב, גם אז הוא חייב להמציא סימנים ממש כפי שהיה צריך לעשות אילו רצה להעביר את רשימת המושאים או את תוצאת החישוב למישהו אחר.³⁴ אין דמיון אלא במידה שניתן לבטאו על־ידי מערכת־מצורפת של סימנים שהוא המציא בשביל עצמו.

בתקופה הקלאסית הלכה והסתמנה בהדרגה התפתחות של שתי מגמות בחקר היצורים החיים: הפיסיולוגיה, שהיתה תוצר של הרפואה; ותולדות־הטבע (Natural History), מגמה שהיתה קשורה לעריכת רשימות מצאי של המושאים בעולם. אולם, בעוד שהאחרונה יכולה היתה להתבסס כמדע, משום שהמחשבה בת־הזמן עודדה ניתוח של מבנים נראים, הראשונה עדיין נשארה מוגבלת בשל העדר מושגים וטכניקות. אין ספק שראוי לערוך הבחנה בין סדרה שלמה של נטיות אידיאולוגיות בפיסיולוגיה זו, שהשתנו בהתאם לחוקרים, למושאי המחקר וליעדיו, ולתופעות שנוצפו. כאן אנחנו מעוניינים רק במושגים שמשתמשים בהם בחקר עולם־החי. באותם ימים רק מושגים מעטים יכלו לשחק תפקיד זה. ואכן, בכל התקופה הקלאסית ניתן היה להבין את התיפקודיות של היצורים החיים רק במידה שהשתקפה בתיפקודיות של הדברים.

המאה ה-17 מצאה עצמה ביקום שמרכזו הכובד שלו הוסט, יקום שבו כוכבים ואבנים צייתו לחוקי המכניקה. מכאן ואילך היו רק שתי דרכים חלופות להקצות מקום ליצורים החיים ולהסביר את התיפקודיות שלהם. מעתה, יצורים חיים היו מכוונות, שבהן היתה משמעות רק לצורות, לגדלים ולתנועות; או שהיו מעבר לחלותם של חוקי המכניקה, ובמקרה זה צריך היה לזנוח את הניסיון למצוא אחדות ולכידות בעולם. מול בחירה זו, הפילוסופים והפיסיקאים – ואפילו הרופאים – לא היססו אפילו לרגע: כל הטבע הוא מכוונה, ממש כפי שמכונה היא הטבע. 'אין זה טבעי פחות לשעון, הבנוי מהמספר הדרוש של גלגלי־שיניים, להורות את השעה,' אמר דקארט, 'מאשר עץ, שהתפתח מזרע זה או אחר, ליצור פרי מסוים.'³⁵ לדעת הובס, בעל־חיים יכול להיחשב למכונה או לאוטומטון, שאבריו נעים כמו אלה של אדם שהוענקו לו חיים מלאכותיים. לא היתה זו מטפורה, השוואה או אנלוגיה. זו היתה זהות. כוכבים, אבנים ויצורים חיים: כל הגופים כפופים לאותם חוקי תנועה. בתקופה הקלאסית היה המכניזם דבר טבעי והכרחי ממש כשם שצורה מסוימת של ויטליזם היתה חיונית בימיה הראשונים של הביולוגיה במאה הבאה.

עד שלהי המאה ה-18 לא הפריד שום גבול בין יצורים לדברים. החי הלך והתפשט ללא מעצור לעבר הדומם. בופון אמר, שהכול רציף בעולם, ו'ניתן לרדת בדרגות שקשה להבחין ביניהן מהיצור המושלם ביותר אל החומר ההיולי ביותר, מבעל־החיים המאורגן ביותר אל המינורל הגס ביותר.³⁶ עדיין לא היתה חלוקה בסיסית בין החי ללא־חי. ההבחנה, שנעשתה בדרך־כלל בין מינורל, צמח ובעל־חיים שימשה בעיקר לייסד את הקטגוריות העיקריות של הגופים בעולם. סיווג זה גם יכול היה להתבסס על דרגת הארגון של הגופים, על כושרם לנוע או על יכולת ההיקש שלהם, כפי שעשה זאת שארל בּוֹנֶה. הוא הבחין בין 'יצורים גסים או בלתי־מאורגנים, יצורים מאורגנים דוממים, יצורים מאורגנים בעלי נפש, ולבסוף יצורים מאורגנים והגיוניים, בעלי נפש.'³⁷ לא היתה כל חלוקה ברורה בין הקבוצות השונות האלה. 'הארגון הנראה של אבנים בצורת עלים או שכבות,' פירט שארל בּוֹנֶה, 'כגון צפחה או טלק, והארגון של אבנים סיביות או אלו המורכבות מזירים, כגון אסבסט, מהווים כמדומה דרגות־מעבר בין מוצקים גסים ובין מוצקים מאורגנים.'³⁸ ארגון עדיין ייצג רק את מורכבות המבנה הנראה. בכל המאה ה-17 ובמרבית המאה ה-18 עדיין לא הוכרה אותה איכות מסוימת של ארגון, שכונתה 'חיים' במאה ה-19. עדיין לא הוכר שיש תיפקודים גדולים החיוניים לחיים, אלא נאמר שמדובר באיברים מתפקדים, ותו לא. הפיסיולוגיה שאפה להכיר את המכונות המפעילות את האיברים ואת המנגנונים שלהם.

אם כן, במאה ה-17 לא היתה שום סיבה מיוחדת להקצות מקום מיוחד לגופים חיים או להבדילם מהמכניקה של היקום. בגופם של בעלי־החיים, רק התיפקודים שהתייחסו ברורות לחוקי התנועה היו נגישים לאנליזה. זה היה נכון לגבי מבנה העצם של בעלי־החיים וגודל גופם, אשר איננו יכול לגדול בלי סוף, אמר גלילאו, 'לא באמנות וגם לא בטבע', מבלי להרוס את הלכידות של האיברים ולהפריע לתיפקודיות הרגילה שלהם. 'אני סבור, שכלב קטן יכול לשאת שניים או שלושה כלבים בני אותו גודל על גבו. אך אינני חושב, שסוס יכול לשאת על גבו אפילו סוס יחיד בגודל כשלו.'³⁹ הוא הדין בתעופת ציפורים, שבמהלכה, ציין בּוֹנֶה, חייב להיות יחס מסוים בין משקל הגוף, מוטת הכנפיים וחוזק השרירים, כדי

שיוכל האורגניזם להתנתק מהאדמה. 'גם אם יהיו לו כנפיים, לעולם לא יוכל האדם לעוף, משום ששרירי חזהו אינם חזקים דים'.⁴⁰ והוא הדין בזרימת הדם בעורקים, במיוחד. הארווי אמר, ש'הסיבים בלב דומים במידת־מה לחבלים באוניה'; השסתומים התלת־חדודיים 'ממוקמים בכניסה לחדרים ממש כמו שוערים'; החדר 'דוחף בכוח את הדם הנמצא כבר בתנועה, ממש כשם ששחקן כדור יכול לשלוח את הכדור בכוח רב יותר ורחוק יותר אם יבעט בו כשהוא בתנועה מאשר אם פשוט יזרוק אותו'.⁴¹ לעתים קרובות נטען, שהארווי תרם לביסוסו של המכניזם בעולם־החי בכך שהשווה את הלב למשאבה ואת מחזור־הדם למערכת הידראולית. למעשה, מדובר בהיפוכו של סדר העובדות. במציאות, הלב הוא שהיה נגיש למחקר דווקא משום שהוא פועל כמשאבה. הארווי יכול היה לבצע את ניסוייו במערכת הדם, משום שניתן לנתח את מחזור־הדם במונחים של נפת, זרימה ומהירות, ממש כמו בניסויים שערך גלילאו עם אבנים. אולם כשניסה הארווי להתמודד עם בעיית הגרביה, שלא כרוך בה מנגנון מסוג זה, הוא לא נחל כל הצלחה שהיא.

התיאוריה על בעל־חיים-מכונה הוכתבה איפוא במאה ה-17 על־ידי עצם טיבה של הידיעה. היא ייצגה גישה שלא ניתן להעלותה על הדעת אצל פֶּרְנַל או אצל נְסֵאלִיוֹס. היה אולי שמץ של מכניזם אצל היוונים, למשל אריסטו או האטומיסטים. אך אצלם המכניזם היה בעל אופי שונה לגמרי. ראשית, משום שהיוונים עסקו באנלוגיות בראש ובראשונה לצורכי הוראה; ואילו במאה ה-17 הסוגיה החשובה היתה איתודם של הכותות השולטים בעולם. שנית, משום שלדעת אריסטו, הנפש היא מקור כל תנועה בגוף החי; לדעת דקארט, לעומת זאת, תכונות המושאים יכולות להיגזר רק מאופן סידורו של החומר. זה היה נכון כשמדובר בתנועותיה של מכונה שחלקיה הנעים נבנים ומסודרים לצורך מטרה אחת ויחידה: לאפשר תנועה מסוימת. מסתבר שזה היה נכון גם לגבי גופו של בעל־החיים, אשר לא היה טעם לייחס לו 'כל נפש שהיא, וגטטיבית או רגישה, וגם לא עיקרון אחר של תנועה וחיים, אלא רק את העקרונות אשר דמו ורוחו הפעילו באמצעות חום האש הבושרת תמיד בלבו ואשר טבעה איננו שונה מכל האשים המצויות בגופים דוממים'.⁴² צריך היה איפוא ליישם את תיאוריית המכניזם גם לכל

היבטיה של הפיסיולוגיה – לא רק לתנועתם של הגוף ושל האיברים, אלא גם 'לקליטת אורות, צלילים, ריחות, טעמים, חום... לרושםם של רעיונותיהם על איבר השכל הישר והדמיון, להישמרות או להטבעה של רעיונות אלה בזיכרון, לתנועות הפנימיות של תיאבון ותאווה'.⁴³ מכאן ואילך כל הגופים בעולם, חיים ושאינם חיים, הוצבו מעבר לתחום השגתה של פעולת-גומלין נידחת, יחס מפוקפק, משיכה או דחיה בגלל סימפתיה או אנטיפתיה. לא הושאר מקום למשחקם של כוחות מאגיים. הכול נעשה אפשרי באמצעות פעולתם של כוחות פיסיקליים.

אולם במהרה התברר, שלא די באמצעים העומדים לרשות המכניזם של התקופה הקלאסית להסברת תיפקודיות היצורים החיים. וככל שהלכה והתגלתה מורכבותם, כן גבר הקושי לייחס את כל תכונותיהם אך ורק לדחפים המופעלים על-ידי גלגיליות, מגופים וצירים. בגירסתו הראשונה לא יכול היה איפוא המכניזם לעמוד מול המשקל המצטבר של התצפיות. ראיית היצורים החיים כמכונות, המורכבות מברגים וגלגלים, מכונות היכולות להעביר רק תנועה נתונה, עוררה בהכרח צורך לחפש משמעות ומטרה מחוץ למכונה עצמה. מכונה ניתן להסביר רק מבחוץ. מאחר שהיא נוצרה למטרה נתונה, היא משמשת רק לביצוע משימתה. מסיבה זו, המאמצים שנעשו בתקופה הקלאסית כדי להדגיש את המכניזם או להגבילו נבעו לאו דווקא מגישתו של המדע בן-הזמן, אלא בעיקר מהמטפיסיקה. בתארו את עולם-החי, הציב דקארט בגפרד שני תחומים: אלוהים, שאיננו מתערב בענייני העולם מרגע שברא אותו ונתן לו את התנועה הראשונית; ומחשבת אנוש, שמורכבותה עולה על זו של בעלי-החיים או כל מה שניתן להשגה באוטומטונים – שפה, למשל. עורבני או תוכי ואפילו אוטומטון אמנם יכולים לבטא מלים, אך אין הם מארגנים אותן בצורה של תשובות, כלומר, בכך 'שהם מראים שהם חושבים כל מה שהם אומרים'.⁴⁴ אלו הן בדיוק הנקודות שהמטריאליזם והאנימיזם ניסו להפריך.

באנימיזם שרווח בתקופה הקלאסית היו שני מרכיבים. ראשית, צורך לקבוע ערך גבוה לחי. בחי יש תמיד מידה מסוימת של מאגיה. בו קשור מעין פטישיזם. בו מסתכם מכלול כוחות הטבע. בו חומר

ניחן בתכונות פלאיות: הוא משופעל, מושפע ומשתנה. לחי, על אוסף הדימויים, המטפורות והסימפניות שלו, יש מקום מועדף בעולם. כבר מלכתחילה הוא מוצב מעל לכל הגופים האחרים. הוא מקבל תמיד את הדירוג הגבוה ביותר. בהשוואה עמו, הדומם מאבד את צבעו ותלת־ממדיותו. המעבר מדברים ליצורים, מאָבֶק למחשבה, מבטא גם הירארכיה של ערכים וגם מורכבות רבה יותר. בקרב היצורים החיים, התופעות לא רק מורכבות יותר, אלא גם מושלמות יותר. איכות מיוחדת כל־כך חייבת להתאים לסיבתיות שאין מושלה. השלמות משתנה במהירות לעיקרון מסביר. הצורך לקבוע ערך לחי בכלל, ולאדם במיוחד, מבוטא באותה תקופה בשני סוגים של אנתרופומורפיזם: נעשית הרחבה של ההירארכיה לעבר אינסופיות של תבונה ריבונית; או להיפך: נעשית השלכה של תכונות אנושיות מסוימות לכל הצורות החיות. דבר זה נראה ברורות, למשל, באופן שפירשו אנשי המאה ה-18 את הסדירות ה'נערצת' של חלות־הדבש בכוורות הדבורים. למן העת העתיקה לא פסק האדם מלהתפעל מן הארכיטקטורה, הסדירות והסימטריה של חלת־הדבש. לקראת שלהי המאה ה-17, פיסיקאים וגיאומטריקנים החלו בוחנים את המבנים הללו מקרוב יותר. הם בחנו את הבסיסים, מדדו את הזוויות, והישבו את היחס ביניהם. למרבה פליאתם נמצא, שכל תא מתאים באופן מדויק לחצי המבנה שקריסטלוגרפים מכירים: תריסרון רומבואידי. זהו בדיוק סוג הסימטריה המאפשר לכל תא לעשות שימוש מיטבי בשטח נתון. כל תא נוגע בשניים־עשר תאים אחרים, שישה באותו מישור, שלושה מעליו ושלושה מתחתיו. כל תא צמוד היטב לשכניו ואין שום חלל ביניהם. לנוכח סידור יעיל כזה אפשריות שתי תגובות: להתפלא למראהו, או לחפש לו הסבר במודל מכני. שלמות ניתן להסביר בשתי דרכים. ראשית, כמו ראומיר, ניתן לייחס לדבורים תכונות אנוש. אם ננקוט דרך זו, הרי התריסרון הרומבואידי מבטא את אמנות הדבורה, את תכונותיה כארכיטקטית ואפילו את חוש החיסכון שלה. 'מאתר שאני משוכנע שהדבורים משתמשות בבסיס פירמידלי, שאכן יש בו יתרונות', אמר ראומיר, 'חשבתי שהסיבה, או אחת הסיבות, שגרמה להן לבחור בשיטת בניה זו, היא הרצון לחסוך בשעווה; שכן בין תאים בגודל זהה בעלי בסיס פירמידלי, הצורה האחת שניתן לבנותה בכמות מינימלית של חומר או שעווה,

היא זו שבה לכל רומבואיד יש שתי זוויות, שכל אחת כ־110 מעלות, ושתי זוויות שכל אחת כ־70 מעלות.⁴⁵ החסכנות של הדבורים מבוססת איפוא על ידע רב במתמטיקה. אבל, בסופו של דבר, בשבתים אלה שהורעפו על הדבורה כרוך רמז להמעטת ערכו של האדם. מבלי להפסיק להתפעל, אפשר, כמו פונטנל, להציג כמה הסתייגויות בקשר לתכונות המיוחדות לדבורים: 'הפליאה הגדולה היא שדיוק הזוויות עולה בהרבה על יכולתה של גיאומטריה רגילה, ונמנה כבר עם השיטות החדשות, המבוססות על תיאוריית האינְ-סוף. בסופו של דבר, דבורים אלו ידעו איפוא יתר על המידה, והתהילה הרבה היא שהובילה לנפילתן. עלינו לקבל ש"תבונה" אינסופית מחייבת אותן לפעול בעיוורון על-פי פקודותיה.⁴⁶ מתמטיקאי עשוי לאפשר לבעל-חיים לדעת קצת גיאומטריה בסיסית - אך לעולם לא מתמטיקה גבוהה!

ולעומת זאת, התגובה השניה לנוכח תאיה של חלל-הדבש מבוססת על ניתוח המתעלם משלמות, וממקם את הפליאה במקומה הנכון. רק צורה ותנועה יכולות להצדיק את סדירות המבנים. ואז, כמו שעשה בופון, ניתן לנתח את התנאים שבהם הסתדרו המבנים הגיאומטריים האלה. צורה הקסאגונלית דומה נמצאת לעתים קרובות בגופים מינרליים ובגבישים, במיוחד בזמן היווצרותם. אבל נמצא אותה לפעמים גם ביצורים חיים: בדופן הקיבה של מעלי גירה, בין גופים המתעכלים שם, בזרעים ובפרחים מסוימים. צורה זו מופיעה תמיד כשעל מושאים בעלי צורה דומה מופעלים כוחות שווים, פחות או יותר, מכיוונים מנוגדים. בדגים מסוימים, למשל, קשקשים הגדלים באותו זמן מפריעים זה לזה. לפיכך הם נוטים להתמקם בשטח הנתון באופן המיטבי ביותר, ולבסוף מאמצים את התבנית ההקסאגונלית הזאת. ניתן גם לערוך ניסויים במודלים מכניים, שבהם מופעל לחץ שווה על גופים גליליים או ספיריים. 'מלאו כלי בשעועיות, או בזרעים גליליים אחרים, אמר בופון, 'וכסו אותן לאחר שמילאתם בו מים כמה שמאפשרים הרווחים בין הזרעים; אחר-כך הרתיחו את המים: כל הגלילים הופכים לעמודים בעלי שש צלעות. הסיבה, שהיא מכנית טהורה, ברורה: כל זרע, שהוא גליל, נוטה לתפוס את מירב החלל האפשרי בשטח הנתון; לפיכך, כולם הופכים בהכרח הקסאגונליים על-ידי דחיסה הדדית.

כל דבורה מנסה לתפוס את החלל המרבי בשטח נתון; מאחר שגוף הדבורה הוא גלילי, צריכים התאים להיות הקסאגונוליים, בגלל אותה סיבה, כלומר כוחות מנוגדים. אנשים מסרבים להבין או שאינם חושדים, שסדירות רבה או מעטה זו תהיה תלויה אך ורק במספרם ובצורתם של בעלי-חיים קטנים אלה ולא בתבונתם; ככל שגדל מספרם, כן רבים הכוחות המנוגדים הפועלים שם, ולפיכך גדלה המגבלה המכנית וגדלה הסדירות הכפויה והשלמות הנראית לעין ביצירת התאים.⁴⁷ מאז ואילך ניתן היה להתבונן בצורתו של התא ולחקור אותו מבלי להתייחס לתבונה כלשהי, דבר שאיננו מפתית כהוא זה מיופיה של חלת-הדבש או מהפיוטיות של הדבורים.

המרכיב האחר של האנימיזם בתקופה הקלאסית היה תגובה נגד המכניזם הקרטזיאני ונגד השימוש-לרעה בו, במיוחד כשנטלו את הלוגיקה שלו והביאוה עד לקיצוניות, כפי שביקשו לעשות דולֶבֶק ולהֶמְטְרִי. הרי זה אבסורדי, אמר הרֶטְסוֹקֶר, שנקודת-המוצא בחקר היצורים החיים יהיה 'הרעיון שכמעט כל דבר נעשה אך ורק בהתאם לחוקי המכניקה, ללא עזרתם של נפש ותבונה'.⁴⁸ באותה תקופה שב האנימיזם למסורת העתיקה שחידשו האלכימיה והרפואה. אולם בגלגולו זה עסק האנימיזם פחות בהדגמת קיומן של תופעות ספציפיות בחי, אלא נאבק יותר בנטיה למטריאליזם. תחילה היתה זו התנגדות לאתאיזם ולנכונות לקבל את המקריות כאחד הכוחות המכוונים את העולם. זה הסירוב להודות, אמר שטאהל, שהסיבות 'אינן יוצרות בהשפעת פעולותיהן אלא תוצאות שרירותיות'.⁴⁹ לשלמות של היצורים, לתכונותיהם ולגנרציה שלהם נדרש עיקרון בלתי-ידוע, נעלם המצוי מעבר לכל ידיעה. צריך היה להיות כוח רוחני, נפש שתוציא אל הפועל רצונות של האל, מאחר שלא היה אפשר למצוא כל הצדקה אחרת לתכליתיות של היצורים החיים. שמות שונים ניתנו ל'גורם' מיסתורי זה: תחילה, בעקבות המסורת, נאמר שמדובר בנפש, אחר-כך תבונה, ואפילו 'טבע פלסטי'. בשלהי המאה ה-18 שינה גורם זה את טבעו במידה מסוימת והיה ל'כוח ויטלי'. באותם ימים כבר לא דובר על עיקרון מרכזי, כוח המצוי בלב האורגניזם ושולט בפעילויות שלו; אלא היתה איכות מיוחדת במינה של החומר שהיצורים החיים מורכבים ממנו, עיקרון

המתפשט בכל הגוף, מתיישב בכל איבר, בכל שריר ובכל עצב, ומעניק להם את תכונותיהם. כל חלק של הגוף ניהן איפוא ב'סנטימנט', ב'טקט', ב'דיספוזיציה', כבסיס לכל הפעילויות שלו. אולם, אף-על-פי שהוויטליזם עמד למלא בסוף המאה תפקיד מכריע בהפרדת יצורים מדברים ובכינונו של מדע הביולוגיה, האנימיזם בתקופה הקלאסית לא היה גורם יעיל בקידום הידיעה. לא משום שהתצפיות שערכו האנימיסטים או הוויטליסטים היו מעטות מאלה שערכו המכניסטים; אלא משום שרק לעתים נדירות נערכו תצפיותיהם בגלל הוויטליזם או כדי להדגים כוח ויטלי. בדרך-כלל נכנס הוויטליזם לתמונה אחרי התצפית, לא לחקור אלא לפרש. לא ויטליזם הוא שהנחה את איזמל המנתחים של ויליס בנייתוח המוח הקטן ובמצאית חיבוריו, וגם לא את עינו של הרטסוקר כשהבחין ביצורונים שבתוך נוזל הזרע של הגבר דרך המיקרוסקופ. כשגילה סוואמקדאם את המטמורפוזה של החרקים, היתה רק חשיבות מעטה לעובדה שהוא ייחס זאת לרוחה של ההשגחה העליונה ולסדירותה. בתקופה הקלאסית היה חשוב קודם-כול לפזר את ענן האמונות ו'סיפורי הסבתות' שאפף את קווי-המיתאר של המושאים והאירועים וטישטש אותם. יצורים ודברים צריכים היו להיפטר מהמיסתורי והמפליא; צריך היה להכניסם לגבולות הנראה והניתן-לניתוח – בקצרה, להפוך אותם למושאי המדע. משום כך ייצג המכניזם, על-אף מגבלותיו, את העמדה היחידה שעלתה בקנה אחד עם הידיעה באותה תקופה. אפילו האנימיסטים, ברצותם לתאר את התהליכים שבהם עסקו הם עצמם, השתמשו באנלוגיות שהיו קרובות ללבם של המכניסטים. 'כל מי שמנסה לתת תיאור סיבתי לתופעות הטבע', אמר הרטסוקר, 'דומה לאדם העומד לפני מכונה מסובכת מאוד, שהוא יכול לראות ולבחון רק מבחוץ'⁵⁰ אולם חייב להבין איך היא פועלת. בסיכומו של דבר, האנימיזם בתקופה הקלאסית, יותר משייצג גישה מדעית ייצג עמדה פילוסופית ואתית.

אכן, עם ניוטון, חל שינוי איכותי במכניזם, ובהקיצו גם את עולם החומרים, הוליד את מדע הכימיה. אל תמונת עולם הדומם שלה צירפה הפיסיקה את חוקי התנועה ואת טבעו החלקיקי של החומר. חומר חדל להיות סובסטרט הומוגני, שניתן לחלקו עד אין-סוף,

אלא משהו המורכב ממספר עצום של חלקיקים בודדים, נפרדים זה מזה ובלתי־זוהים. עולמו של דקארט היה בנוי מתומר ומתנועה; ואילו ניוטון הוסיף מרחב לעולמו, כלומר חלל שבתוכו נמצאים החלקיקים בתנועה. מה שהחזיק את החלקיקים במקומם וקשר אותם יחד ליצירת יקום מלוכד, היה כוח המשיכה. כוח זה לא היה מרכיב של היקום. לא היה לו חלק בבנייתו. אולם הוא טווה בין כל האטומים, המרכיבים את היקום, רשת של יחסית־ליות, הנותנת לכידות לעולם. מושג המשיכה הוא שהמציא לכימאים כוח, שהחליף את השפעות הכוכבים, אשר, לדעת האלכימאים, קשרו בין המתכות ובין הכוכבים וכוכבי־הלכת. כשעירבבו תומרים הם לא נשארו אינרטיים, אלא תפסו זה את מקומו של זה. לכן, בין גופים שונים אפשר היה למצוא קשרים שגרמו להם להתחבר זה לזה בקלות, פחות או יותר. לפי ז'ופרואה, כאשר שני חומרים שיש להם 'נטיה כלשהי להתחבר זה לזה' אכן מתחברים, אם מופיע חומר שלישי בעל זיקה חזקה יותר לאחד מהם, הוא מתחבר אליו 'בכך שהוא גורם לחומר האחר להתיר את אחיזתו בו'.⁵¹ הכוח המחבר גופים מסוימים בעלי טבע שונה נקרא 'זיקה'. מעתה כבר לא היה זה עיקרון מאגי, סגולה הדומה לסגולות שייחסה האלכימיה לחומרים, אלא זו היתה תכונה של גופים, שניתן למדוד אותה על־ידי מציאת הסדר שעל־פיו הם תופסים זה את מקומו של זה.

בהדרגה, נתחמו קבוצות, משפחות של גופים בעלי תכונות משותפות מסוימות, כמו חומצות או בסיסים. כל פרט במשפחה מסוימת יכול היה ליצור צירופים עם כל פרט במשפחה אחרת. ניתן היה איפוא לסווג חומרים, ממש כמו לסווג צמחים, ולמטרה זו צריך היה לאמץ את אותה שיטה: הסיווג שהשתמש בו לבואז'יה, הפעולות שביצע והשיטה שיישם היו דומים לאלה של ליניאוס. בעיסוק בחומרים, ממש כמו בעיסוק בצמחים, צריך היה להכיר את התכונה האופיינית של החומרים ולתת להם שמות לפי התיפקוד של תכונה זו. למעשה, במדעים הפיסיקליים צריכה המלה לבטא את הרעיון, והרעיון צריך לתאר את העובדה. שכן, אמר לבואז'יה, אלו הן שלוש הטבעות של אותו חותם.⁵² מאחר שהכימיה היא בעיקרה מדע אנליטי, למתן שמות לגופים יש חשיבות מיוחדת: 'שיטה אנליטית היא שפה, ושפה היא שיטה אנליטית'. עד לאותה

תקופה היתה שפת הכימיה הטרוגנית מאוד. לביטויים מסוימים, שמקורם באלכימיה, היה אופי סתום ומשמעותם היתה נהירה רק ליודעי-דבר. מונחים אחרים, לעומת זאת, יוחסו לגופים שלא בהתאם לתיפקוד תכונותיהם, אלא בגלל נסיבות מקריות לחלוטין: גילוי הגופים או מראם. הכימאים השתמשו במונחים 'שמן טרטר', 'חמאה ארסנית' או 'פרחי אבק'. אבל ללבואזיה היה חשוב להכניס את רוח האנליזה למדע הכימיה, ודבר זה ניתן היה להיעשות רק על-ידי שכלול של אוצר-המלים. תחילה צריך היה לתת שמות לחומרים הפשוטים שאינם ניתנים לפירוק באנליזה כימית. 'עד כמה שיכולתי', אמר לבואזיה, 'הענקתי שמות פשוטים לחומרים פשוטים... באופן שיבטאו את התכונה הכללית ביותר, האופיינית ביותר, של החומר.⁵³ לגופים מורכבים, שנוצרו על-ידי איתוד של כמה חומרים פשוטים, צריך היה לתת שמות מורכבים. מאחר שמספרם של הצירופים הבינאריים גדל במהירות, צריך היה לערוך סיווג כדי למנוע בלבול. 'לפי הסדר הטבעי של הרעיונות, השם של המחלקות ושל הפרחים מתייחס לתכונה המשותפת למספר גדול של פרטים-יחידים; ולעומת זאת, השם של המינים מציין את התכונות המיוחדות לפרטים-יחידים מעטים.'⁵⁴ תומצות, למשל, עשויות משני חומרים, הנחשבים לחומרים פשוטים. האחד נותן את תכונת החומציות המשותפת לכול: שם המחלקה או הסוג צריך להתבסס על תכונה זו. ואילו החומר השני הוא אופיין של חומצה מסוימת: לכן הוא חייב לקבוע את השם היתודי.⁵⁵ ומה שהיה מקובל בחומצות היה בריישום גם לגופים אחרים, לתרכובות מתכת, לחומרים מתלקחים וכו'. באופן זה היו החומרים נגישים לסדר ולמדידה. יכולים היו לסווגם, לכנותם בשמות ולמדוד את תכונותיהם. בדרך זו הפכה הכימיה למדע, אשר לו טכניקות, שפה ומושגים משלה.

עם ההתפתחות הזאת שחלה במדע הכימיה, כצורה משופרת של מכניזם, תחום חדש בפיסיולוגיה נפתח למחקר. במאה ה-17 יכול היה הארווי לחקור את מחזור-הדם, מפני שמבין כל התיפקודים הפיסיולוגיים החשובים, הוא היחידי התלוי כמעט באופן בלעדי בחוקי התנועה, שהרי הלב הוא משאבה, והדם הוא נוזל המציית לחוקי ההידראוליקה. באותה דרך, העיכול והנשימה, שני

תיפקודים שאפשר היה לנתחם במושגיה ובשיטותיה של הכימיה, נעשו נגישים למחקר במאה ה-18. ראומיר וספאלאנצאני יכלו להתחיל בחקר העיכול, שכן, כדברי ראומיר, 'הוא מתבצע על-ידי פעולה אחת ויחידה של ממיס, ועל-ידי התסיסה שהוא גורם לה'.⁵⁶ מיץ קיבה מתחיל שרשרת של ריאקציות כימיות; הוא פועל 'על בשר ועצמות בדרך שמימלך (aqua regia) פועלים על זהב'. באותה דרך יכול היה לבואזיה להבין נשימה, משום שנשימה של ציפור ובעירה של נר יכולות להיחשב למושאי מחקר דומים: את שניהם ניתן לנתח בעזרת אותם מושגים, אותן שיטות ואותן מדידות. ההקבלה לבעירה הביאה את לבואזיה לקשר נשימה עם תיפקודים אחרים, או לפחות עם אלה שניתן לחקור בעזרת מושגי הפיסיקה והכימיה. תחילה קישר לבואזיה בין נשימה לעיכול: בשלהי המאה ה-18 כבר לא חשבו שיש אש ללא צריכה של חומר בעירה, 'לכן, אילמלא אכלו בעלי-חיים מזון ובכך השלימו את מה שהפסידו בנשימה, במהרה היה חסר שמן במנורה ובעל-החיים היה נכחד כמנורה שכבתה בגלל העדר חומר בעירה'.⁵⁷ אחר-כך קישר עיכול למחזור-הדם, בגלל הצורך להביא חומר בעירה אל המנורה. לאחר מכן קישר אותו לאידוי, משום שבנוכחות אש, הבוערת תמיד, יש צורך להישמר מפני עליית הטמפרטורה. בתיפקודו של כל איבר היה איפוא תחום שאפשר היה לחקור בעזרת טכניקות כימיות – אפילו את התהליכים המתרחשים במוח ואת תהליכי החשיבה. 'אפשר לגלות כמה קילוגרמים הם שווי-ערך למאמציו של אדם הנושא נאום, או מוסיקאי המנגן בכלי נגינה. אפשר אפילו להעריך את המאמץ המכני הכרוך בחשיבה של פילוסוף, בכתיבה של אדם משכיל או בחיבור יצירה מוסיקלית בידי מלחין'.⁵⁸

לדעת לבואזיה, אפשר לחקור בעל-חיים כמו שתוקרים מכונה. אמנם אין זו מכונה הפועלת רק במונחי צורה ותנועה, אלא בהתאם לעקרונות מגוונים ביותר, שהרי תופעות חשמליות נתגלו אפילו בשריר הרגל של צפרדע. המודל הטוב ביותר לתיאור גוף חי היה מנוע-קיטור: עם מקור חום שיש להזינו, עם מערכת קירור ומיתקנים שאת פעולות חלקיהם השונים צריך לכוונן ולתאם ביניהן. 'מכונת בעל-החיים', אמר לבואזיה, 'מנוהלת על-ידי שלושה בקרים ראשיים: נשימה, הצורכת חמצן ופחמן ומספקת כוח

חימום; אידוי, הגובר או פוחת בהתאם לכמות החום שצריך להעביר; ולבסוף עיכול, המחזיר לדם את מה שהוא מאבד בנשימה ובאידוי.⁵⁹ שלושה תחומים שונים אלה בפיסיולוגיה יכלו להיחקר מפני שנעשו נגישים לשיטות ולמושגים של הפיסיקה והכימיה. ולהיפך, האנלוגיות שנצפו והמודלים שהשתמשו בהם תרמו גם הם למהפך קיצוני באופן ייצוגם של היצורים החיים בשלהי המאה ה-18. בתיפקודו של אורגניזם, כל דבר תאם זה לזה, כל היסודות היו קשורים יחד, וכל החלקים היו מחוברים זה לזה. מעבר לצורות הנראות, הסתמנו דרישות הפיסיולוגיה. מעתה, גוף חי לא היה אך ורק התאגדות של יסודות, מקום המיפגש של איברים פועלים; אלא מערכת מאוחדת של תיפקודים, שכל אחד מותאם לדרישות מדויקות. האיברים לא רק תלויים זה בזה, אלא שנוכחותם וסידורם הם תוצאה של צרכים שנקבעו על-ידי חוקי הטבע, השולטים בחומר ובטרנספורמציות שלו. מה שנתן ליצורים את תכונותיהם הפנימיות היה משחק הגומלין של הקשרים המאחדים בהסתר את החלקים, כדי שהשלם יוכל לתפקד. מדובר בארגון החבוי מעבר למבנה הנראה. מכאן ואילך התאפשר הרעיון של צבר של איכויות מיוחדות של היצורים: מה שהמאה ה-19 תכנה בשם 'חיים'.

המין (species)

במשך כל התקופה הקלאסית נודעו היצורים החיים ונחקרו בעיקר על-פי המבנה הנראה שלהם. רשת ההשוואות באה במקום הרשת הנושנה של קווי-הדמיות. ידיעת הדברים היתה מבוססת על הקשרים בין הדברים, וההוויות שלהם וההבדלים ביניהם. אם הדבר שחיפשו אחריו והדבר הנתון ניחנו ב'טבע מסוים', ההשוואה היתה פשוטה וברורה. אם לא, נדרש ניתוח ממושך של המושאים, כדי לגלות את הטבע המשותף המצוי מעבר למורכבות הפרופורציות אולם לצורך ניתוח והשוואה, לא הוקצה ערך שווה לכל האיכויות שהחושים יכולים לזהות באובייקטים אלה. רק מה שנראה איפשר להבין את היקום. שכן, אף-על-פי שרואים כוכב, אי-אפשר לגעת בו, לטעום אותו או לשמוע אותו. יתכן שבעמדתו כלפי עולם-החי התקשה שכלו של האדם להשתחרר מהרגלים ומרעיונות שנרכשו

במשך מאות שנים. הוא היה צריך לסלק שפע של דימויים אשר, כדברי טורן־גפור, 'מעייפים את הדמיון',⁶⁰ וכך לכנס את היצורים החיים אל בין הגבולות שתחמה עינו של הצופה. רק לקראת שלהי המאה ה-17 נדחו כל האנלוגיות המסופקות, כל הקשרים הבלתי־נראים וקווי־הדמיות המעורפלים, כל מה ש'איננו בהיר ואיננו גלוי ליכולת [הקליטה] הנמוכה ביותר', אמר ליניאוס,⁶¹ רק אז יכול היה להתפתח חקר תולדות־הטבע, אשר מושאו היה המבנה הנראה של היצורים החיים, ומטרתו – סיווגם.

בחקר תולדות־הטבע צריך לערוך תחילה תצפיות ביצורים החיים ולתארם. לתארם, משמע, לומר מה העין מבחינה ביצור ובה בשעה לדחות כל דבר אשר 'איננו גלוי וברור ללא שימוש בזכוכית מגדלת'.⁶² משמע, לצמצם את היצור הזה להיבט הנראה שלו, לתרגם למלים את צורתו, גודלו, צבעו ותנועתו. התיאור צריך היה להתעלם מפרטים, אך לא לדלג ולו על אחד היסודות 'המיוחדים' או המהותיים שלו. הוא צריך להיות מדויק ומתומצת. 'אין שום טעם', אמר ליניאוס, 'להכביר מלים כשניתן להסתפק במלים מעטות'.⁶³

חקר תולדות־הטבע תובע איפוא שהן הצופה והן מושא התצפית יהיו ניחנים באיכויות מיוחדות. כדי להיות חוקר־טבע צריך קודם־כול להיות מסוגל לדחות דימויים מקובעים ולדעת איך לערוך תצפית. אך לא די בתצפית. חוקר־טבע גם צריך לדעת להבחין בדברים החשובים – ושום דבר מלבדם. אין הוא יכול להסתפק בבדיקת האורגניזם בשלמותו. הוא חייב לנתחו, לבחון את חלקיו, לתפוש את מהות מאפייניו. מושא התצפית צריך למלא את דרישות המחקר. מובן מאליו שקל יותר לפרק צמחים לפרטי פרטיהם מאשר לעשות כן בבעלי־חיים. הצמח איננו עמוס בתשוקות ובסימנים סודיים. מאחר שהוא מתנועע ורוטט, בעל־חיים משנה כל העת את צורתו. מאחר שאיננו זז, צורתו ועיצובו של הצמח זמינים תמיד לצופה בו. מתחת למעטה החיצוני של בעל־חיים חבוי שטח מיסתורי; מתחת לשיער, לנוצות או לשריון מצוי עולם האיברים הסודי והמעורפל ומכונת הקרביים. ואילו בצמח דבר איננו מוסתר. כל איבריו גלויים לעין, וכל

שימושיהם ברורים. ברור למדי, ציין טורנפור, 'שקל יותר להבין מבנה של מכונה ולזכור ביתר קלות את שמות החלקים המרכיבים אותה, אם אנו יודעים למה משמש כל חלק'.⁶⁴

במבט ראשון, מבנה של בעל־חיים או אפילו של צמח הוא אובייקט ארכיטקטוני מורכב מאוד. קשה להשוות את הצורות כמכלול. אולם כשקובעים מהי רשת קווי הדמיון והשוני לא של האורגניזמים כמכלול, אלא על־פי חלקיהם, לאחר האנליזה, המורכבות הופכת לפשטות. כל מה שנראה בצמח, מוצג בבירור כמערך של קווים, שטחי־פנים ונפחים. המבנה הכללי מצטמצם למיקבץ של צורות גיאומטריות, פחות או יותר – שוב, בתנאי שהאיכויות המשמשות נושא לתצפית נבחרות באופן נכון, שכן לא כל התכונות הנראות מאפשרות מידה שווה של הכללה. בצבע, למשל, עשויות לחול וריאציות משמעותיות מפרט־יחיד למשנהו. התיאור, אמר ליניאוס, 'חייב לעשות שימוש במונחי האמנות, אם די בהם, ולהציג את החלקים לפי מספר, צורה, פרופורציה ומצב'.⁶⁵ ההשוואה איננה צריכה להיעשות איפוא בין צמח לצמח, אלא רק בין מספר האבקנים, צורתו של גביע הפרח, מקום המאבקים, והפרופורציה בין אבקנים לעליים. בסיכומו של דבר, אפשר לייצג כל צמח כמיקבץ של יסודות שמספרם והפרופורציות שלהם נתונים. כל אחד מאלה יכול להתגוון עד אין קץ, וכל וריאציה מצטרפת לשאר הווריאציות במספר צירופים אינסופי. בוטניקה הפכה למין מערכת־מצורפת, אשר מספר אפשרויותיה הוא כמעט בלתי־מוגבל.

את מיקבצי היסודות האלה צריך לסדר ולסווג – ומסיבות שונות, זוהי משימה מורכבת במיוחד. ראשית, רבגוניותו של עולם־החי: מספר הזנים הידועים, שכבר בשלהי המאה ה-17 מנו למעלה מכמה עשרות אלפים, הוסיף לעלות, והמיקרוסקופ הסיר את כל הגבולות בעולם־החי. הקושי השני היה רציפות. עד המאה ה-19, לא רק שלא היתה מחיצה ברורה בין יצורים לדברים, אלא שעולם־החי כולו נראה כמארג רציף. כל דבר בו היה מדורג ומעורב זה בזה. הטבע, כך נטען, לא דילג דילוגים. הוא בנה גשרים בין הולכי־על־ארבע, ציפורים ודגים, ומתח גשרים אלה לכל עבר. הכול נקשר יחד, חובר

ונארג זה בזה. 'את העטלף משגר הטבע לעוף בין הציפורים, 'אמר בופון, 'ואילו את הארמדילו כלא בשריון של סרטן; את הלוייתן צר כאילו היה הולך על-ארבע וקטע את ארבע גפיהם של סוס־הים ושל כלב־הים, אשר לאחר היוולדם על היבשה, הם צוללים בנחשולי הים ומצטרפים ללוייתן, כאילו להראות את הקירבה האוניברסלית של כל הדורות שנוולדו מאם משותפת.⁶⁶ ודאי שאפשר לסדר את היצורים בקטגוריות, אך הטבע עצמו איננו מכיר במחלקות. ההבדל בין שני יצורים מטיפוסים שונים אך קרובים הוא מזערי, 'כך שההבדל אינו יכול להיות קטן יותר, 'אמר רובינֶה, 'מבלי שהאחד יהיה בדיוק ההעתק של האחר, ולא גדול יותר מבלי שיהיה פער ביניהם'.⁶⁷ שני יצורים אלה קרובים זה לזה עד כמה שאפשר. המעבר מיצור אחד למשנהו איננו מאפשר שום צורת ביניים ושום חלל ריק. שכן, 'אילו היה חלל ריק בין שני יצורים כלשהם, 'אמר שארל בונה, 'מדוע יש שם מעבר מאחד לשני?⁶⁸ יש איפוא מספר אינסופי של צורות ביניים בין הדרגה הנמוכה ביותר לדרגה הגבוהה ביותר בסדרות היצורים החיים. היצורים החיים בשלמותם יוצרים סדרה רציפה, שרשרת שאין לה סוף, 'המתפתלת כנחש סביב כדור־הארץ, חודרת למעמקי הים העלומים, מזנקת אל האטמוספירה וצוללת בחלל השמימי, 'אמר בונה.⁶⁹ רק בגלל בורותנו, חוליות מסוימות בשרשרת נסתרות מעיינו, ולכן חוקרי־הטבע יכולים להעיף רק מבט חטוף בחוליות הפגומות. הקשר בין פרטים מכל הסוגים הוא כה קרוב, עד שכמכלול, הם יכולים, כדברי אדנסון, 'ליצור ישות אחת, יצור אוניברסלי אחד שהם יהוו חלקים שלו.⁷⁰

לבסוף, הקושי השלישי היה לכונן סדר בעולם־החי, שהרי, כפי שאמר בופון, 'בטבע יש למעשה רק פרטים־יחידים; ואילו סוגים, סדרות ומחלקות קיימים רק בדמיונו.⁷¹ אילו נקטנו דרך קיצונית, הרי כדי לעקוב אחר הטבע בנאמנות, צריך היה סיווג היצורים החיים להסתעף עד אין־סוף; ומספר הקטגוריות שצריך היה להכיל, רב היה כמספר הפרטים־היחידים. במצב מעין זה אין המחקר המדעי אפשרי. כדי לחקור בוטניקה, צריך לערוך פשרה עם הטבע. לדעת טורנפור, צריך 'לאסוף צמחים הדומים זה לזה, כאילו הכנו זרים, להפרידם מאלה שאינם דומים'.⁷² משמעו של דבר, להבחין ב'קווי הפרדה' במקום שיש כמדומה רציפות, למצוא פערים אשר

כנראה אין הטבע מבחין בהם. אולם, גם אם לאמיתו של דבר אין היקום מחולק, בעינינו הוא נראה מחולק. די בדבר זה כדי להצדיק את הניסיון לסווג, ותפקידו של חוקר הטבע הוא למצוא את הפערים הברורים ביותר לעין. 'את הסדר הזה, שהוא הכרחי כל-כך', כתב פונטנל בספר *Eloge de Tournefort*, 'לא כונן הטבע, שהעדיף אי-סדר מופלא ולא דווקא את מה שנוח לפיסיקאים. לפיכך מוטל עליהם לכונן, כמעט למרות הטבע, סדר וארגון בעולם הצומח.⁷³

כדי לסווג את הצמחים, צריך לייצגם במערכת של סמלים – כלומר, לתת להם שמות. נתינת שם לצמת, משמע לסווג. שתי הפעולות כרוכות זו בזו ללא הפרד; הן שני היבטים של מערכת-מצורפת אחת שצריך לקשור אותה אל המערכת-המצורפת של המבנים הנראים, כלומר, המערכת-המצורפת של שטחיה-הפנים והנפחים אשר לסידורם-מחדש חבים הצמחים את רבגוניותם. מקום המיפגש, נקודת ההצטלבות של מה שניתן לראותו, לכנותו בשם ולסווגו, היא התכונה האופיינית. לפי ליניאוס: 'הצמח צריך להיות ידוע לפי השם, והשם ידוע לפי הצמח, ושניהם על-פי התכונה האופיינית הפרטית, הכתובה בשם ומשורטטת בצמח.⁷⁴ התכונה האופיינית בהיותה קשורה לפרטי המבנה, משמשת 'סימן פרטי' של הצמח.⁷⁵ היא מייצגת את העקבות החייבים להוסיף ולהתקיים במחשבה לאחר בחינתו ותיאורו של צמח. ואכן, לתאר, משמע לומר הכול, לאסוף את כל העובדות הנראות. לעומת זאת, מציאת התכונה האופיינית, משמע לאסוף מצמחים מסוימים את התכונות המשותפות שעל-פיהן ניתן להבחין ביניהם לבין צמחים אחרים. מעל לכול, משמע שמבין שפע התווים הנראים, בוררים את אותם פרטים מיוחדים, הנשארים במחשבה, קשורים תמיד עם הצמח ובאים במקום הדימוי המפורט שלו. על-ידי עיסוק בתכונה אופיינית אחת ויחידה של הצמח, על-ידי מתן שם לצמח ושמירת האיכות הזאת לבדה בתודעה – בקיצור, על-ידי צמצום הצמח לתכונה אופיינית יחידה – התודעה משתחררת מן התוהו-והוה של דימויים חושיים. ואז היא יכולה לבצע את עבודת הסיווג שלה.

סיווג הוא תמיד פירמידה, או הירארכיה, הבנויה ממערכים של

מחלקות ברמות שונות; כל מחלקה כוללת תת־מחלקה אחת, או יותר, ברמה נמוכה ממנה. כל הירארכיה יכולה לתפקד עם דרגות מורכבות שונות. הירארכיה פשוטה, כמו ב'דיספוזיציה סינופטית'⁷⁶, שבה מצטמצמת ההירארכיה למערך של מלות־מפתח דיכוטומיות רצופות; או הירארכיה מורכבת יותר, כמו בסיווגים 'סיסטמטיים', שבהם כל מחלקה ברמה אחת כוללת יותר משתי מחלקות שברמה שמתחתיה. במאה ה-18, עולם־החי בכללו אורגן על־פי הירארכיה בעלת חמש רמות: ממלכה (kingdom), מחלקה (class), סדרה (order), סוג (genus) ומין (species). הקבוצה האחרונה היתה מורכבת מצורות שונות, אשר רבגוניותן באה, לפי ליניאוס, 'רק משינויים מקריים שנגרמו בדרך־כלל על־ידי אקלים, קרקע, חום, רוחות וכד'.⁷⁷ כשהיא לעצמה, חלוקת היצורים החיים לחמש רמות נעשתה לשם נוחות, ותו לא. משמעותה היתה, שאורגניזם לא סווג כהלכה, אלא אם כן ניתן לסדרו, באופן ברור או לא, בקבוצה מוגדרת בכל רמה ורמה.

היו שתי דרכים לבניית טיפוס של הירארכיה מעין זו. אפשר היה לבנותה על־פי דדוקציה לוגית כלשהי, או באופן אמפירי; כלומר, על־ידי 'מערכות' (systems) או על־ידי 'שיטה' (method). השימוש ב'מערכות' היה לו ותק רב יותר מהשימוש בשיטה; הוא מגיע מאריסטו דרך הסכולסטיציזם. כדי לבנות מערכת, צריך שכבר יהיה רעיון מסוים על־אודות טבעם של האובייקטים שיש לסווגם ועל היחסים ביניהם. מספר המערכות היה איפוא רב כמספר הרעיונות, או אפילו כמספר הבוטנאים. מספר המשתנים איפשר להתאים את הסיווג לנתונים האמפיריים, כדי לקבל את הדיוק הנדרש. כל המערכות ניסו להבין את סידור התכונות האופייניות ואת הקשר הלוגי, שבאמצעותם יתאפשר הסיווג באופן הטוב ביותר. וכדברי טורנפור: 'צריך להזדקק לאמנות הצירופים: כלומר, צריך לצרף את חלקי הצמחים זה לזה באופן כזה שלבסוף אפשר יהיה לבחור את אותם צירופים היוצרים את תכונותיו האופייניות של הסוג (genus), השופכות אור רב יותר ומתיישבות יותר מכול עם הניסיון.⁷⁸ אחר־כך מנתחים את צירופי האפשרויות שנעשה בהן שימוש בחלק זה או אחר של הצמח, וכבסיס לסיווג נבחר אותו חלק הנותן את המספר המרבי של הצירופים האפשריים מאלה המצויים

בטבע. הבחירה השרירותית באמות־מידה היא שתקבע אילו חלוקות ייעשו.

לעומת זאת, השימוש ב'שיטה' לא דרש שום מושגים אפריורי. אלא די היה להשוות את האובייקטים זה לזה, בדיוק ולפרטי פרטיהם, כדי לגלות את ההבדלים ביניהם. לפיכך יכולה להיות רק שיטה אחת. לפיה, בוחרים בצמח אחד למטרות התייחסות, מניחים עליו כביכול צמחים אחרים, ומציינים בדקדקנות מה חסר בהם, מה מקביל ומה נוסף. 'תחילה הכנתי תיאור של כל צמח', אמר אדגסון. 'הנחתי כל חלק מהצמח לפרטי פרטיו במספר מרבי של היטלים נפרדים ושירטטתי אותו; משהופיעו מינים חדשים, הקרובים לאלה שכבר תוארו, תיארתי אותם בנפרד, מבלי לשוב ולציין את קווי־הדמיון, אלא רק את ההבדלים ביניהם.⁷⁹ באופן זה, מרבית קווי־הדמיון נשארו כרקע נייטרלי, המבליט את ההבדלים. מתוך ההקבצה הטבעית של ההבדלים, התבלטו לעין קווי־ההפרדה. החלוקות הן הקובעות איפוא את הירארכיית המחלקות, והן מתבלטות, פחות או יותר, לפי היקף ההבדלים.

מסתבר איפוא ש'מערכות' ו'שיטה' נגזרו מעקרונות שונים זה מזה ואולי אפילו מנוגדים זה לזה. אולם אף־על־פי שהתהליך היתה שונה, השפה היתה משותפת לשתי הטכניקות. ומאחר ששתיהן איפשרו לבנות הירארכיה זהה בת חמש רמות, גם התוצאה היתה דומה. בשני המקרים, נעשתה בחירה שרירותית בשלב מסוים, אשר כל המבנה ההירארכי מתבסס עליה בסופו של דבר. מכאן נובע קושי שהיה משותף לכל הסיווגים. 'הנקודה הבעייתית ביותר בכל ההיסטוריה של המדע', אמר בופון, 'היא הצורך לדעת איך לעשות הבחנה נכונה בין מה שאמיתי בנושא ובין מה שאנו כוללים בו באופן שרירותי כשאנו בוחנים אותו.⁸⁰ לדידם של חסידי טכניקת המערכות (ריי, טורנפור או ליניאוס) כמו גם של חסידי טכניקת השיטה (מניול, אדגסון או האחים ז'וסיה), הבחירה בשיטת סיווג חדשה היתה מוצדקת בגלל שיקול אחד ויחיד: פחות החלטות שרירותיות, יותר קטגוריות טבעיות. חוקרי תולדות־הטבע שאפו לגלות את הסדר האמיתי שבטבע. לשם כך צריך היה להבחין בין המהותי למקרי.

במשך מאות שנים, מזמנו של אריסטו ועד לתקופה הסכולסטית ובמהלכה, אחדותה של קבוצה חיה היתה מבוססת על המהות שלה, שהיתה סיכומם של 'סוג' ו'הבדל'. בתקופה הקלאסית חל שינוי במשמעות ובתפקיד של מה שהיה קרוי המהות של היצורים החיים, אבל החיפוש אחרי המהותי עדיין נשאר הבסיס של כל נסיונות הניתוח והסיווג. בעת השוואת צמחים נודעה חשיבות להבדלים במהותם ולא לתאונות שאירעו במקרה או למשתנים שמחוץ לחוקי הטבע. 'המבנה', אמר טורנפור, 'הוא התכונה האופיינית העיקרית, שלפיה מובחנים באופן מהותי הצמחים זה מזה.'⁸¹ אבל כולם הסכימו, שהיתה מידה רבה של שרירותיות גם בבחירת התכונה האופיינית. אפשר היה להשתמש בתכונה האופיינית בכל נקודה בתהליך השוואת הצמחים, בהתאם למה שציפו ממנה; מ'סימן מיוחד' של איבר מסוים ועד לאוסף התווים הלקוחים מהצמח בשלמותו. לדעת ליניאוס, התכונה האופיינית יכולה היתה להיות 'משלושה סוגים: מלאכותית, מהותית או טבעית'.⁸² כדי לקבוע את החלוקות בין מחלקות, חשוב היה להשתמש רק 'בתכונה האופיינית העיקרית, הנבחרת ביותר',⁸³ ולדחות את כל התווים המקריים, הגובעים מבית-גידול, טמפרטורה, השקיה, חשיפה לשמש או לרוח; בקיצור, מכל מה שנתון לשינוי בגלל תנאי הגידול. ה'עיקרי' בצמח נעשה היחודיות שכפה עליו הטבע, שאיננה תלויה בכל פעולה חיצונית שהיא. המהותי, בהיותו מנוגד למקרי, היה בהכרח אובייקטיבי. הוא לא היה תלוי בתצפיות, אלא במוצאו המרוחק בעת הבריאה. הסדר שלפיו אורגנו המהויות של היצורים החיים הוא זה שהוכתב על-ידי הטבע, ולא על-ידי ההיגיון. המהות של הצמחים העניקה לחוקר-הטבע מצפון נקי, כביכול. היא הרשתה לו לחלק את המחלקות 'ללא נקיפות מצפון',⁸⁴ כפי שיעץ טורנפור, שהיה מעוניין ביעילות ותו לא. ומה שהיווה את המהות בצמח, לדעת ליניאוס, היה מה שנכפה עליו על-ידי 'הגנרציה הרציפה של המינים'.⁸⁵

ל'מערכות' ו'שיטה', אמנם היתה לוגיקה פנימית משלהן, אולם לא היה ללוגיקה זו כל קשר לממשות של הטבע. לפיכך התעורר צורך לפנות ליסוד חיצוני, שלא היה מצוי אך ורק במבנה הנראה של היצורים, אלא בתמידותו של מבנה זה במשך הדורות. בשלהי

המאה ה-17 הופיע איפוא מושג המין (species), בגלל הצורך של חוקרי הטבע לבסס את סיווגיהם על הממשות של הטבע. המין היה לקטגוריה מועדפת, משום שהיה מבוסס לא רק על קוֹדֵמיוֹן מסוים בין הפרטים היחידים, אלא גם על רצף של דורות, היוצרים תמיד את הדומה. 'הזהות היחודית בין שור לפרה', אמר ג'ון ריי, 'כמו זו שבין גבר לאשה, נובעת מהעובדה שהם נולדים לאותם הורים, ולעתים קרובות לאותה אם'.⁸⁶ במבנה של בעלי־חיים ושל צמחים נשמר סדר, משום שמבנה זה, על מכלול תכונותיו, הועבר בנאמנות מהורים לצאצאיהם. הצורה היחודית של יצור חי הועברה בדרך כלשהי אל זרעו, וכפי שהעיר ריי, 'לעולם אין מין נולד מזרעו של מין אחר, ולהיפך'. זה היה נכון בתנאי שכל בני־הכלאים העֶקְרִים, כל ה'פְּרָדוֹת', שנוצרו על־ידי הזדווגויות שלא כדרך הטבע, לא הוכללו במינים. כדי שמין ישמור את תכונתו האופיינית האוניברסלית, הגנרציה צריכה היתה להיות 'רציפה, מתמדת, ובלתי־משתנה', אמר בופון, 'במלה אחת, דומה לזו של בעלי־חיים אחרים'.⁸⁷ בתנאים אלה, תהליכי הטבע בעולם־החי כמו בעולם־הדומם התרחשו באופן סדיר: הם צייתו לחוקים, שהמין היה אך ורק ביטוי אחד שלהם.

בסיכומו של דבר, בתקופה הקלאסית התבסס חקר תולדות־הטבע על התכונה של היצורים החיים להוליד את הדומה להם, והגובע מכך, מושג המין. למעשה, מושג המין תיפקד בשתי רמות, כדי לאפשר את סיווג עולם־החי. ראשית, מאחר שהמין לא התבסס אך ורק על חלוקה שרירותית כלשהי של העולם הנראה, אלא היתה כרוכה בדבר גם סדירות של הטבע עצמו, המין סיפק מסד מוכר, משותף ומקובל על הכול עבור כל הסיווגים, שהוא היווה את יחידת־היסוד שלהם. מין לא היה מעולם מקור למחלוקות כמו שעורר המושג סוג (genus). הוא הצדיק את המאמץ להשליט סדר בשרשרת היצורים, ליצור את המארג הרציף של עולם־החי. רק אם מינים אכן 'מתקיימים' יכול היה מדע היצורים החיים להתבסס לא רק על מה שאנשים מדמיינים לעצמם, אלא על מסדים טבעיים. שנית, תמידותו של המין במשך הדורות הבטיחה שעולם־החי, כפי שהוא עתה, הוא אכן השתקפות מדויקת של מה שהיה בעת הבריאה. 'אנו מכירים כל־כך הרבה מיני צמחים', אמר ליניאוס, 'עד

שמספרם כמספר הצורות הקבועות והשונות שנבראו בבראשית'.⁸⁸ לא די לכונן סדר בעולם־החי, כדי שחקר תולדות־הטבע ימצא את מקומו בגוף הכללי של הידיעה בעולם. הסיווג גם צריך היה ליצור קשר בין עולם־החי בן־הזמן ובין עולם־החי בעת בריאתו. מושג המין הוא זה שהבטיח את תמידות הצורות החיות מאז הבריאה. 'ביקום, הפרט־היחיד הוא לא־כלום,' אמר בופון,

אפילו מאה או אלף פרטים־יחידים הם לא־כלום. המינים הם היצורים היחידים בטבע; יצורים מתמידים, עתיקים וקבועים כטבע עצמו; אפשר לבחון כל אחד כמשהו שלם, בלתי־תלוי בעולם, שלם שמנו אותו כאחד בעת הבריאה, וכתוצאה מכך הוא אך יחידה אחת בטבע.⁸⁹

שהרי הקשרים הטקסונומיים שניתן לקבוע בין היצורים בהקשר למבנה הנראה שלהם, מבוססים תמיד על סדרה של הנחות לוגיות מוקדמות: תמידות צורות אצל טורנפור וליניאוס; שילוב תיפקודי של אורגניזמים אצל קובינה; ולבסוף, צאצאות אבולוציונית אצל דארוין.

היווצרות־מוקדמת (Preformation)

עם מושג המין, הגנרציה היתה לביטוי של סדירות הטבע. אולם בתקופה הקלאסית יכלו להעלות על הדעת את הגנרציה רק בעזרת המבנה הנראה של היצורים החיים וחוקי המכניקה. שלא כמו חקר מחזור־הדם, את תופעות הגנרציה לא היה אפשר לחקור על־ידי מדידת נפחים, תנועות ומהירות, וגם לא לתארן במונחים של מגופים, גלגילות ומשאבות. כשחקר הארווי את הגנרציה של היצורים, הוא לא יכול היה לעשות הרבה יותר ממורו, פבריציוס אַקוואפְּנְדֶנְטָה, אשר הדגיר ביצי תרנגולות ומדי יום פתח ביצה אחת, כדי ללמוד על מצב העובר. הארווי הקריב את האיילות של צ'ארלס הראשון, מלך אנגליה, ובעונת ההרבעה שלהן ניתח מדי יום איילה אחת, כדי לבחון את תכולת רחמה. אבל הוא ראה רק מסה חסרת־צורה, ערמה קטנה ודביקה, מעין 'צלקת' שבה הופיעו וגראו בהדרגה לב, כלי דם, מעיים, ראש ורגליים. הארווי נאלץ לערוך כמה

אנלוגיות, לאו דווקא משכנועות: הנקבה מופרית על-ידי הזכר 'באותו אופן שברזל אשר נוגע בו מגנט רוכש סגולה מגנטית'.⁹⁰ או: הרחם נראה כמו מוח, כי 'ההזדווגות מגרה ברחם משהו הזהה... לדמיונות או לתשוקה במוח'.⁹¹ מאחר שבמוטו לספרו *Treatise on Animal Generation* כתב הארווי את אימרתו המפורסמת 'omnia ex ovo' [הכול מהביצית], נזקף לעתים קרובות לזכותו הרעיון שכל יצור חי מופיע מביצית. אבל לדידו של הארווי, 'ביצית' (ovum) היא הרבה יותר מ'ביצה' (egg); ביצית, משמע כל חומר שהוא כבר מאורגן במידת-מה – בשר מרקיב, צמחים מעופשים, הפרשות, גולם או זחל של חרקים; בקיצור, כל מה שממנו הופיע, כפי שאפשר היה לראות, יצור חי, בין אם הוא הולך על ארבע, זבוב, תולעת או צמח.

במאה ה-16 קל היה להסביר בריאה ספונטנית בדיוק כמו להסביר גורציה על-ידי זרעים, כי לשם כך נדרשה פעולתם הישירה של כוחות אלוהיים על החומר. במאה ה-17, ארגון החומר וחוקי התנועה החליפו את הכוחות הטמירים הללו, והם נדרשו להמציא הסבר להיווצרות היצורים החיים, לנפילת הגופים או לתנועת הכוכבים. אכן, לדידו של דקארט לא היה בכך קושי מיוחד. מאחר שהחומר היה זהה בכל הגופים בעולם, שהרי יצורים ודברים נבדלו זה מזה רק לפי אופן סידורו של החומר הזה בתוכם. כדי להפיח חיים בחומר ולהפוך אותו לגוף חי, לא היה צריך כמעט ולא-כלום – מעט חום או לחץ, מעט חיכוך כדי ליצור ריאקציה בין החלקים השונים. 'מאחר שדרוש כל-כך מעט כדי ליצור יצור, אין זה צריך להפתיע שכל-כך הרבה בעלי-חיים, תולעים וחרקים נוצרים באופן ספונטני לנגד עינינו בכל החומרים הרקובים'.⁹² חום ותנועה צריכים לפעול בהדרגה על כל חלק בתורו. לא בבשר ולא בביציות של בעלי-חיים מושלמים, לא יכול להיווצר יצור קטן בבת אחת, ולזנק מזוין מכף רגל ועד ראש כמו האלה אֶתְנָה מראשו של זאוס. החומר הולך ומתארגן באופן מסודר ומתקדם, איבר אחר איבר, כמו מנגנון של שעון מורכב ביותר. ביצורים היוצרים את הדומים להם, כל המנגנון כבר מוכן מראש על-ידי סידורו של החומר בזרע. בדברו על התפתחות העובר השתמש דקארט במונחים דומים לאלה שהשתמש בהם לאפלאס מאוחר יותר בתארו את תנועת היקום: 'אילו היטבנו לדעת מהם כל חלקי הזרע של בעלי-חיים מסוים,

למשל של אדם, יכולנו להסיק מדבר זה בלבד, בעזרת נימוקים ודאיים ומתמטיים, על צורתו ומבנהו של כל אחד מאיבריו.⁹³

אולם הבריאה הספונטנית קרסה בהדרגה תחת נטל משקלן ההולך וגדל של התצפיות. בעזרת זכוכית מגדלת או מיקרוסקופ רכשה עין האדם אט־אט מבט קרוב יותר על החרקים, ומורכבות המבנה הנראה שלהם הלכה והתגלתה לו. בהדרגה נתגלתה רשת מסובכת של סיבים, של כלי־דם ושל עצבים, השזורים זה בזה בדיוקנות. 'מספר החלקים האורגניים שיש בזבוב הוא לפחות כמספרם אצל סוס או שור, ואולי אף יותר', השתאה מלבראנש. 'לסוס יש רק ארבע רגליים ולזבוב יש שש... בעין השור יש רק עדשה קריסטלינית אחת... ואילו בעין הזבוב אנחנו מוצאים כיום אלפי עדשות כאלה.'⁹⁴ תצפיות של סוואמרדאם ומאלפיגי גילו את המטמורפוזה של תולעת המשי, הצרצר, החיפושית והפרפר. חוקרי־הטבע האלה תיארו את איברי המין ואת דרך ההזדווגות של יצורים אלה. התצפיות המצטברות הללו לא תאמו את הדעה המקובלת בדבר היווצרותם של תולעים או זבובים, היינו, שהם נוצרים על־ידי החום של התסיסה בבשר. אולם אם כבר במאה ה-17 אפשר היה לבטל את הדעה בדבר בריאה ספונטנית של חרקים, הרי זה משום שהניסויים הדרושים היו כרוכים רק בתנועה – תנועת האוויר ותנועת היצורים החיים. די היה בהנחת בשר בכלי אטום היטב, כדי למנוע את רקבונו או את יצירתם של זבובים בו. בספרו על גנרציה הסביר פרנצ'סקו רָדִי, שקריאה בהומרוס, במזמור י"ט של ה'איליאדה', העלתה בדעתו את הרעיון לערוך ניסוי מסוג זה. אם די ברקבון הבשר כדי להוליד חרקים, שאל רדי, מדוע היה אכילס כה מודאג ורצה להבטיח, שגופו של פאטרוקלס לא יהיה טרף לזבובים? מדוע ביקש מתִּיִּס שתגן על הגוף מפני חרקים העלולים ליצור רימות ולהשחית את בשר המת?⁹⁵ ניסויים הראו שפחדיו של אכילס היו מוצדקים. 'רימות אלה נולדות כולן על־ידי הזרעה', אמר רָדִי, 'והחומר הרקוב שהן נמצאות בו איננו אלא המקום או הקן שבו בעלי־החיים האלה מטילים את ביציהם בזמן הגנרציה ואשר בו הזחלים מוצאים את מזונם; במלים אחרות, אני קובע, שדבר איננו נולד אי־פעם מחומר זה.'⁹⁶ הוא הדין ברימות החיות במעיים של בני־האדם ושל בעלי־החיים. אין הן נולדות

מהקרביים של פונדקיהן, אלא מזרע המצוי באוויר, במים או במזון והוא נשאף או נבלע על-ידי בעלי-החיים. הוא הדין בחרקים הנולדים בצמחים. לא הפרי, השורשים או העפצים של צמחים הם הגורמים להופעתם, אלא חרקים המטילים שם את ביציהם. בשלהי המאה ה-17 כבר הוכח, שתולעים, זבובים וצלופחים נולדים מתולעים, זבובים וצלופחים. במקום שהופיע יצור חי, שם גם היה יצור דומה שהולידו. על-פי ההיגיון, תורת הבריאה הספונטנית צריכה היתה להיעלם; אולם היא מצאה לה במהירות מפלט בעולם היצורונים (animalcules), עולם בלתי-נראה וגרוטסקי במידת-מה, שהתגלה פתאום בעזרת המיקרוסקופ במי שלוליות, בנוזל-צמחים ובריר. ולא די היה בניסויים נוספים כדי להיפטר מתורת הבריאה הספונטנית. תחילה צריך היה לגבש את מושג המין, להגדיר את גבולותיו ולבסס את תמידותו.

סודה של הגנרציה על-ידי הורים היה חבוי בזרע. שם צריכים היו עקרונות הצורה והתנועה להתליף את הכוחות הטמירים. שכן טעויות של כושר ההיווצרות, שגיונות העולים בדמיונה של האם, השפעה של מזון או של חלומות על היווצרות הילד, בקיצור, כל הפנטזיות ואי-הסדירויות המפריעים למהלך העניינים הרגיל, היו בניגוד להרמוניה של היקום ולחוקי הטבע. אבל במאות ה-17 וה-18, ההיבט היחידי של גנרציה שהיה נגיש לשיטות אנליטיות, ההיבט היחידי שהיה זמין לאמצעי התצפיות ולכוח ההפרדה של המיקרוסקופ, היה תכולת הזרעים. רק שם יכלו חוקרי התקופה הקלאסית להשתמש בנתונים ובחלקיקים במקום בעקרונות ובסגולות. באותה תקופה יכולה היתה להישאל אחת השאלות הפשוטות ביותר: מה מכיל הזרע של כל זווּיג (sex), וביתר דיוק, מדוע בעלי-חיים מסוימים מטילים ביצים בעוד אחרים יולדים יצורים חיים? באמצעות בדיקה, חיתוך והצצה לתוך גופים נמצא לבסוף, כי 'אשכי' הנקבות של יולדי-חיים מכילים מסות קטנות גדושות בנוזל הדומה לחלבון ביצה ההופך לצהוב אחרי ההזדווגות. נָנְיָה דה-גראף אף הצליח למצוא מיתאם בין מספר הגושים הללו ובין מספר העוברים המופיעים ברחם. הללו נחשבו לביציות עצמן, עד שבמאה ה-19 הראו האמבריוולוגים כי הגושים שמצא דה-גראף הם למעשה זקיקים המקיפים את הביציות האמיתיות. בשלהי

המאה ה-17 היו איפוא לכל הנקבות ביציות. 'כבר אין לי שום ספק שאשכי האשה הם שחלות,'⁹⁷ אמר סְטֶנוּ. בכל מקרה, אם בעלי־החיים הקטן בקע מביצה, כמו האפרוח, או יצא חי מבטן אמו, כמו העגל, מדובר בתהליך זהה. בעזים, בכבשים, בפרות, בכל בעלי־החיים שנותחו, נמצאה תמיד אותה אנטומיה. 'גורציה מתרחשת באותה דרך אצל נשים,' אמר דה־גראף, 'היות שיש ביציות באשכיהן וצינורות המחוברים אל הרחם כמו אצל החיות.'⁹⁸ למרות מחאותיהם של אנשים משכילים, שזעמו על שמשווים אותם לתרנגולות, דיונים אינסופיים הוסיפו להתקיים בשאלה, האם יכולות הביציות להיווצר ללא הזדווגות, האם הן קיימות גם אצל נשים בתולות או אצל נשים פריגידיות, והאם האשה משחררת ביצית כל חודש בזמן הווסת, או להיפך – האם הביצית משתחררת רק בעקבות 'צליפת התענוג'.

בנוזל הזרע של הזכר גילה המיקרוסקופ יצורים רבים לאין ספור, ממש כמו אלה הנמצאים במי שלוליות או בתמצית קש – יצורים חיים קטנים, דמויי־תולעים, הנעים ושוחים לכל עבר. בעולם זה, שעד כה לא חשדו בקיומו ופתאום התגלה תחת המיקרוסקופ, נמצאו מקום ותכלית רק ל'יצורונים' שבנוזל הזרע של הזכר. קשה היה לדעת כיצד להסביר את היצורונים הנמצאים במי שלוליות, מהו מקומם, והאם לראותם כנושא של פליאה או של שערוריה. לעומת זאת, היצורונים שבנוזל הזרע של הזכר כמעט ייצגו את מה שההיגיון חיפש אחריו. אם הזכר צריך למלא את תפקידו, אם צריך לשלול מנוזל הזרע עקרונות וסגולות, אזי חייבים למצוא חלקיקים וגופים מאורגנים. למעשה, התוצאות עלו על המשוער. 'מספרם של בני־האדם על־פני כדור־הארץ איננו רב כל־כך כמספר היצורונים בנוזל הזרע של זכר יחיד,'⁹⁹ אמר לבנהוק, שהיה זהיר והוסיף, שהבדיקות לא נעשו על חשבון צאצאיו שלו.

אם כן, בנקבות יש ביציות ובזכרים יש יצורונים; ובכך צריך להיות די כדי ליצור את המורכבות של בעלי־החיים. אם דוחים את הרעיון בדבר כושר ההיווצרות ושוללים התערבות של כוחות טמירים כלשהם, אם רוצים לארגן את החלקיקים של הזרעים ולהפוך אותם לבעלי־חיים בעזרת חוקי התנועה בלבד – אזי אין פתרון לבעיה.

'לא יתכן שאיחוד שני הזוויגים ייצור משהו כה מופלא כגוף של בעל־חיים', אמר מלבראנש. 'אפשר בהחלט להאמין, שדי בחוקים הכלליים של העברת התנועה, כדי לעצב ולפתח את חלקיהם של גופים מאורגנים. אך אי־אפשר להאמין שהם ייצרו אי־פעם מכונה כה מורכבת.¹⁰⁰ בתקופה שהיצורים החיים ניכרו אך ורק על־פי המבנה הנראה שלהם, עצם התקיימותו של המבנה הראשוני הזה ברצף הזמן, דור אחר דור, היא שדרשה הסבר בהקשר לגנרציה. המבנה עצמו לא יכול היה להיעלם: הוא חייב היה להוסיף ולהתמיד מדור לדור באמצעות הזרעים. כדי לקיים את רציפות הצורה, הזרע צריך היה להכיל את ה'נבט' של היצור הקטן העתידי; הנבט צריך היה 'להיווצר מוקדם'. הנבט כבר מייצג את המבנה הנראה של הילד העתידי, הדומה למבנה הוריו. זהו הפרוייקט של הגוף החי העתידי, לא בכוח – בחלק פעיל כלשהו של הזרע אשר ממנו הולך ומתארגן בהדרגה הגוף של היצור הקטן, כמו שמוציאים תוכנית אל הפועל – אלא כבר ממומש, כמו מיניאטורה של האורגניזם העומד להופיע בעתיד. הדבר דומה למודל בקנה־מידה קטן, שכל חלקיו, קטעיו ופרטיו כבר נמצאים במקומם. הגוף המוגמר של היצור העתידי, שהוא אמנם אינרטי, וממתין; ההפריה רק משפעת את אותו ומתחילה את גדילתו. רק אז יכול הנבט להתפתח, להתרחב בכל הכיוונים ולהגיע לגודלו הסופי, כמו פרח־נייר יפניים, אשר משהונחו במים הם נפרשים, נפתחים ומקבלים את צורתם הסופית. כך קורה גם בבעל־חיים ובצמחים: ואכן, בזרעיהם של צמחים רבים ניתן להבחין בצורתו המיניאטורית של הצמח העתידי, לפרטי הפרטים: את מיתאר הגבעולים, הענפים, והעלים המקופלים. אין צורך לארגן חומר בזמן ההפריה והתפתחות העוברית. כל יצור חי מתחיל כמשהו שכבר דומה לו. בבעל־חיים כבצמחים, די במנופים, בגלגילות ובקפיצים להבטחת התפתחותו של הנבט, שהיא רק בעיה של גדילה. כל קטע של הנבט מתרחב בהדרגתיות לכל עבר, כדי שלאחר גדילתו המלאה יהיה מה שהיה קודם לכן במיניאטורה.

באותה תקופה, השאלה העיקרית שיכולים היו להציג בסוגיית הגנרציה היתה איפוא, מי מבין שני הזרעים, זכר או נקבה, מכיל את הנבט? ברור שיכולות היו להיות שתי אסכולות. אחת הטוענת

שהנבט מצוי בביצית; הפוריות נמצאת איפוא בנקבה, אשר בשחלתה נמצאת, אינרטית, הצורה המיניאטורית של היצור החי העתידי, מחכה לרגע ההפריה. במקרה זה, הזכר ממלא רק חלק צנוע מאוד, הוא רק משפעל את הנבט בדרך כלשהי על-ידי נוזל הזרע. למעשה, הוצגו שפע של טיעונים שהעדיפו לייחס את התפקיד העיקרי בגרציה לביצית. ראשית, גערכו ניסויים בביצי תרנגולות, שמאלפיגי ואחרים הבחינו בהן צורות של האפרוח העתידי, ללא כל דגירה. התרנגול אינו מצויד באיבר להחדרת זרעו, אלא מפזר נוזל זרע על הביצים כדי לשפעל אותן. הוא הדין בדגים: הזכר רק מפזר נוזל זרע על הביצים שהנקבה מטילה. והוא הדין בצפרדעים, שצורת ההזדווגות שלהם מוזרה מאוד: הזכר מתיישב מאחורי הנקבה ומקיף אותה בזרועותיו; כך הם נשארים צמודים במשך שבועות ואיש איננו יודע איך ממלא הזכר את תפקידו. סוואמרדאם טען, שצפרדעים כמוהן כדגים, ולפיכך הזכר מפזר את זרעו מעל הביצים שהנקבה משחררת. אולם הוטל ספק אם ההפריה יכולה להתקיים מחוץ לגוף הנקבה, ובכל מקרה, היה קשה לראות כיצד יכול היה הנבט להיות בכל מקום שהוא אלא בביצית. באשר לגבר, כל אחד יודע שהנוזל שהוא משחרר בתענוג כה רב איננו חודר לרחם של האשה, אלא נוזל החוצה ברגע שהוא משתחרר. היו ידועים מקרים רבים של גערות שנכנסו להריון גם מבלי שנתנו לנוזל הגבר לחדור לתוכן. רק החלק ה'רוחני' של הנוזל הוא שחדר אל הרחם, עלה לשחלות וחדר לביצית דרך אחד הנקבים הקיימים בה לשם כך. או אולי אותו חלק 'כמוס' של נוזל הזכר חדר לכלי-הדם של האשה, ושם נספג בדמה וחולל בו 'נזקים הגורמים עינוי לנשים', הגיע אל השחלה ושם הופרתה הביצית רק לאחר שהופרה כל דמה של האשה. אמנם כן, העובדה שילדים דומים לאב עשויה היתה לעורר מבוכת־מה; אך היה ברור למדי, שהכוח של הזכר, המרוכז ברוחו של נוזל הזרע, מילא תפקיד בארגון העובר. ואכן, צורת העובר תלויה בגורמים שונים: צורת הנבט, כמובן; פעילות האם ואורח־חיה בתקופת ההריון; אך גם הכוח שבאמצעותו שופעלו חלקי העובר כשהוספגו ברוחו של נוזל הזרע של האב.

אולם אפשר היה לתמוך בתזה הנגדית, זו שמיקמה את הנבט ביצורונים השוחים בנוזל הזרע של הזכר. כלומר, הפוריות מיוחסת

לזכר, 'זוה מתאים יותר לכבודו'. לשם מה להמציא יצורים הדרושים לגנרציה בביצית, כשניתן לראותם שוחים סחור סחור בנוזל הזרע של הזכר? הגנרציה של יצורים חיים נעשתה איפוא לא יותר מאשר התפתחותם של אותם יצורונים, שכל אחד מהם, אמר הרטסוקר, 'מכיל חיה קטנה, זכרית או נקבית, של אותו מין החבויה תחת קליפה רכה ועדינה'.¹⁰¹ תפקיד הנקבה מוגבל איפוא והיא מספקת את הקן ואת המזון ההכרחי להתפתחות היצורונים. אלה חודרים לרחם, עולים לתוך השחלה ומחפשים מקום מתאים כדי להשתכן בו. רק אחד מצליח לחדור לביצית, אשר לה 'ק פתח אחד, המאפשר כניסה לתולעת אחת', אמר הרטסוקר. 'וברגע שאחת נכנסת, הפתח נסגר ואיננו מאפשר לתולעת נוספת להיכנס'.¹⁰² מרגע שהתמקם בביצית שלו, היצור הקטן גדל ומתפתח אט אט בהדרגה, עד שהוא מגיע לגודל ולבשלות המתאימים ללידה. בעקבות בדיקה מדוקדקת של היצורונים, הובחנו לבסוף שני סוגים. 'יש יצורונים שזוויגם שונה', אמר לבנהוק, 'וניתן להבחין ביניהם בזכר ובנקבה'.¹⁰³ רבים ניסו לגלות בעזרת המיקרוסקופ את הצורה של כל בעל-חיים ביצורון שלו, אך לשווא. על-אף כל מאמציהם, לא ניתן היה להבחין איזו צורה חבויה תחת קליפתו של היצורון. אפשר היה רק לדמיון את העובר הזעיר המעוכב בגידולו, בצורת הומונקולוס, למשל, רגליו מקופלות אל גופו וראשו נח בין זרועותיו, יושב לו בתוך התולעת הקטנה שלו.¹⁰⁴ לא היתה ברירה אלא לקבל מצב זה. הנבט נראה כדג או כגולם של חרק, בהתאם לנוהגו של הטבע. מי יכול היה לזהות את החיפושית בגולם אשר ממנו היא נולדת? מי יכול היה להאמין כי פרפרים נפלאים, בעלי כנפיים זוהרות, החלו את חייהם כזחלים מעוררי-גועל, המתנהלים אט-אט לדרכם? אין שום ספק, סיכם ז'ופרואה: 'אדם מתחיל את דרכו כתולעת'.¹⁰⁵

באין אפשרות להיעזר במבנה המשני, החבוי, ההיווצרות-המוקדמת של גבטים ייצגה בתקופה הקלאסית את האמצעי היחידי המבטיח את קביעותם של המבנים הנראים על-ידי צאצאות; אף-על-פי-כן, דבר זה רק הצעיד את הבעיה צעד אחד אחורה. שכן, הגנרציה האמיתית הפכה להיווצרות הנבט בזרע. עכשיו צריך היה להסביר את מקורו של הנבט וכיצד הוא מתארגן. יתרה מזו, הקושי נשאר

בעינינו, שכן אם אין רוצים להתייחס לסגולת ההיווצרות משמע שיש לחזור אל חוקי התנועה, שבהם לא היה די לארגן את הנבט, כפי שלא היה די בהם לארגן את העובר. נשאר רק פתרון אחד: להניח שכל הנבטים של כל האורגניזמים, בעבר, בהווה או בעתיד, התקיימו תמיד; שהם נוצרו בעת הבריאה; שרק חיכו לרגע השפעול על-ידי הפריה. זו היתה התיאוריה בדבר הקיום המוקדם של הנבטים. מאחר שכל הנבטים היו כנראה זעירונים, מובן שלא היה אפשר לראותם, אפילו דרך המיקרוסקופ. אבל, אמר מלבראנש, 'המחשבה איננה צריכה לעצור במקום שהעין רואה, כי תזון המחשבה חודר עמוק יותר מחזון העין.'¹⁰⁶

ניתן לראות קיום מוקדם בשתי דרכים בהקשר למיקום הנבטים המצפים לשפעולם. ראשית, יכולים היו למקם את הנבטים מחוץ ליצורים החיים הקיימים ולהפיצם בכל עולם הטבע, כפי שהציע קלוד פֶרוֹ. הנבטים קטנים מכדי שנוכל לראותם בעין, אך הם קיימים במים, במזון שבני-אדם אוכלים, או באוויר שהם נושמים. 'גנרציה איננה יכולה שלא להתרחש', אמר פרו. 'מאחר שסוגיהם ומיניהם של הגופים הקטנים רבים לאין ספור בעולם כולו, הם מתקשים שלא להופיע בחומר ההומוגני של הזרע, או שלא להינשא אליו.'¹⁰⁷ נבטים בוחרים בבני אותו המין כדי להשתכן בהם וליצור את היצור הזעיר, המצפה להפריה כדי לצמוח.

אבל באותה מידה יכולים היו למקם את הנבטים בתוך היצורים החיים. במקרה זה, היצורון שנוצר מוקדם מכיל את הנבטים של ילדיו העתידיים, ואלה מכילים את הנבטים של ילדיהם העתידיים, וכן הלאה. בתוך חרצן יחיד של תפוח נמצאים, לפי מלבראנש, 'עצי תפוח, תפוחים וזרעי תפוח רבים למאות הבאות, שהן רבות לאין ספור או כמעט לאין ספור, בפרופורציה של עץ-תפוח אמיתי מושלם אחד לעץ-תפוח שבזרע.'¹⁰⁸ והוא הדין כשמדובר בבעלי-החיים. הנבטים של כל האנשים האפשריים בכל הזמנים נוצרו בזמן הבריאה, וכפי שניסח זאת סוואמרדאם, הם יכולים היו להיות מוכלים בחלציה של חוה או בחלציו של אדם הראשון.¹⁰⁹ הכול תלוי במקום שהוקצה לנבטים: בביצית או ביצורון. אם הנבט מצוי בביצית, אזי 'הנקבות של בעלי-החיים הראשונים נבראו עם כל

הפרטים של אותו מין שצריך ללדת אותם בכל הזמנים.¹¹⁰ לעומת זאת, אם הנבט ממוקם ביצורון, אזי 'הזכרים הראשונים נבראו עם כל הפרטים של אותו מין שצריך להוליד אותם עד סוף כל הזמנים'.¹¹¹ מכל מקום, שתי הגירסאות של היווצרות-מוקדמת מניחות שנבטי הזכר והנקבה שונים זה מזה, מאחר שרק אחד מכיל את הנבטים של כל צאצאיו, המקננים זה בתוך זה כמו בובות רוסיות. מדור אחד למשנהו, גודל הבובות הולך וקטן ביחס של אורגניזם לביצית שלו. הרך שייולד בעוד אלפי שנים מעוצב איפוא כהלכה ממש כמו זה שייולד בעוד תשעה חודשים. רק הגודל שונה. הזערערות של הנבט, העושה אותו בלתי-נראה לעין האדם, איננה מוציאה אותו מתחום חלותם של חוקי הטבע. מובן שצריכה היתה להיות סיבה לדאגה, אילמלא ידענו שתומר ניתן לחלוקה עד אין-סוף. עקרונית, היווצרות-מוקדמת צריכה להגן על התפתחות העובר מפני הזיות הדמיון של אמו. ובכל זאת, 'רק לפני שנה', כתב מלבראנש,

אשה התבוננה שעה ארוכה בתמונתו של פיוס הקדוש, ביום ההקדשה שלו, וילדה ילד שדמה באופן מושלם לתמונתו של הקדוש. היו לו פנים של אדם זקן, עד כמה שדבר זה אפשרי אצל ילד שאין לו זקן. זרועותיו היו צלובות על חזהו ועיניו מופנות כלפי שמים... כל פאריס ראתה אותו, וגם אני, מאחר שהוא השתמר במשך זמן ארוך למדי בכוהל.¹¹²

מאחר שלרשותו של החוקר במאה ה-17 לא עמדה אלא הידיעה על המבנה הנראה של היצורים החיים ועל חוקי המכניקה, הוא נאלץ לשייך את הגנרציה האמיתית, זו המארגנת את היצורים החיים מחומר, לתחום הסיבות הראשוניות, כלומר, לאל. ואת זאת הוא סירב לשקול. המדע התעניין רק ביקום כפי שהוא בזמנו – כלומר, בתוצרי הבריאה ובחוקים המבטאים את סדירות תנועותיהם. אף-על-פי שגנרציה של יצורים חיים עדיין לא נראתה כרה-פרודוקציה, כרה-פורמציה של הילד בדמות הוריו, בכל זאת חל שינוי בתפקידה ובמעמד. הגנרציה כבר לא היתה בריאה מבודדת, שאיננה תלויה באחרות – המימוש הישיר של כוונה שאיננה קשורה בכוונות דומות. ייצור של יצור חי נעשה שלב אחד במימוש ההדרגתי של פרויקט אחד ארוך-טווח במשך כל הזמנים.

כדי שדומה ייצור תמיד דומה, וכדי לקיים את המין, הנבטים של כל הפרטים היחידים המהווים את המין צריכים היו להיברא ביחד על-פי אותה תבנית ובאותו זמן. מאחר שבאותם ימים לא היה אפשר לדמיין שכל לידה היא שחזור של מבנה נראה, הנעשה בהשפעת מבנה מסדר גבוה יותר, הפתרון האפשרי היחיד שנשאר היה יצירתם של כל הדורות הרצופים בבריאה, הנעשית בעת ובעונה אחת. מי שנועדו להיות האב, הבן והנכד צריכים היו איפוא להיברא ביחד. הרעיון של קיום מוקדם התאים איפוא למושג המין. אם הנבט, שנוצר מוקדם בזרע מולידו, עוצב בזמן הבריאה יחד עם כל שאר בני מינו, הרי שאין עוד מקום להתערבות תיצונית במשך הגנרציה, וגם לא לאי-סדירות בגלל פנטזיות של ההורים, או בגלל חטאים שהם בניגוד לטבע. דורות יכולים לבוא בעקבות דורות, זהים תמיד, מפני שהם תמיד תוצאת שפעולם של תוצרים זהים הנשלפים מאותו מאגר בסיסי. המין נעשה אוסף של נבטים, קרן שמורה של עותקים, שנעשו באותה תבנית.

היווצרות מוקדמת וקיום מוקדם הציבו את הגנרציה של היצורים החיים על אותו המישור עם תופעות הטבע האחרות. היצורים כמו גם הדברים, 'אינם יכולים להתחיל [את קיומם] אלא בבריאה, אמר לייבניץ, 'או לסיים [את קיומם] אלא על-ידי הכחדה.'¹³ היקום זינק מידיו של האל, מעוצב בשלמותו ומצויד בכל חלקיו. בכוחו של רצון האל, הכול נוצר מאין. כל כוכב, כל אבן, כל יצור חי שיוולד במהלך הזמן, נוצר בבריאה מוגדרת ומוגמרת. אחרי התנופה ההתחלית הזאת, המערכת פעלה באופן סדיר על-פי תוקי הטבע וללא כל התערבות אלוהית נוספת. כוכבים סובבים במסילתם, אבנים נופלות, ויצורים חיים נולדים.

במהלך המאה ה-18, וכל עוד היצורים החיים נחשבו לצירופים של יסודות נראים, היווצרות מוקדמת וקיום מוקדם הם שהציעו את הפתרון האפשרי היחיד לסוגיית הגנרציה. הם שהמציאו את המענה היחיד לטיעון של פונטנל:

אתה אומר שחיות הן מכוונות ממש כמו שעונים? אם תניח, זה בצד זה, מכוונה-כלב ומכוונה-כלבה, בסופו של דבר, התוצאה תהיה מכוונה קטנה

שלישית, ואילו שני שעונים, שיהיו מונחים זה בצד זה כל חייהם, לעולם לא ייצרו שעון שלישי.¹¹⁴

יצירתו של יצור חי נשארה איפוא תוצאה של פרויקט שלא היה אפשר להפריד בין הורתו והתגשמותו ובין בריאת העולם. הסדר הנראה של היצורים החיים הוא זה שהשתמר עלידי צאצאות. רציפותן של הצורות החיות במין ובמשך הזמנים הצריכה את רציפותן במשך תהליכי הגרציה עצמם. כיצד יכולה היתה תרנגולת להיווצר מביצה, אלא אם כן הכילה הביצה את מה שמאפיין תרנגולת, כלומר, מבנה נראה מסוים? ובאשר לשפעול ולהתפתחותו של הנבט, 'לא יהיה זה הגיוני יותר לשאול אותנו כיצד זה קורה,' אמר האלר, 'מאשר לשאול מדוע ספיגת הזרע של הזכר גורמת לזקנו לבצבץ.'¹¹⁵

אולם מתצפיות רבות שנערכו במאה ה-18 מתברר, מה רבים היו תשומת-הלב המדוקדקת, הסבלנות והאמינות של חוקרי-הטבע; ניסויים רבים מגלים את התושיה והמיומנות שהם ניחנו בהן. המחקר הניסויי עדיין היה תלוי בעקרונות ובטכניקות של המכניזם. לכן הוא הוגבל לאותם היבטים של גרציה שהיו נגישים לשיטותיו של המכניזם: למשל, כריתת גפיים או אפילו חיתוך של גוף לחתיכות, שהיו מלווים בתצפית על התוצאות. מרכיב הגרציה, שהיה נגיש יותר מכול לאנליזה מכנית, הוא כמובן הזרע עצמו. אפשר למנוע את הנוזל הספרמטי מלהגיע אל מטרתו הטבעית, או לאסוף אותו בנפרד ולערבבו אחר-כך עם הביציות. יכולים היו למהול את הנוזל או לחממו, ולבדוק אם הוא עדיין פעיל. בדרכים אלו נעשתה גרציה נגישה למחקר ניסויי, אף-על-פי שהטכניקות עדיין היו פרימיטיביות למדי. אולם ההיזקקות להיווצרות מוקדמת היתה כה גדולה, והאפשרות של פתרון אחר כה בלתי-מתקבלת על הדעת, עד שפירשו כל תוצאה שהתקבלה כאילו היא תומכת בתיאוריה על הנבט שנוצר מוקדם.

המחלוקת בדבר חלקם של ביציות או יצורונים בגרציה, כלומר למי התפקיד העיקרי בה, הוכרעה במהרה לטובת הביצית, כתוצאה מגילוי רביית-בתולים (parthenogenesis). לפי הצעתו של ראומר

התחיל שארל בונה לחקור את הרבייה של הדבורנים. להפתעת הכול נמצא, שפרט־יחיד יכול לייצר צאצאים. 'קח פרט קטן בלידתו', יעץ בונה,

שים אותו מיד בבדידות מלאה, וכדי להבטיח את בתוליותו, נהג בזהירות מופלגת, והיה עירני אפילו יותר מאַרְגוֹס שבמיתולוגיה היוונית: משיגדל היצור הקטן קמעה, הוא יתחיל ללדת, ולאחר ימים ספורים תמצא אותו מוקף במשפתה גדולה.¹¹⁶

מאחר שיש בנמצא אורגניזם היכול להתרבות 'מבלי לקיים יחסים מיניים עם פרט אחר בן מינו',¹¹⁷ קשה לראות כיצד יכול הנבט להיות ממוקם אך ורק בביצית. האלר ושארל בונה הניחו שניהם, שהקרום המרפד את תוכו של החלמון הוא המשכו של הקרום העוטף את המעיים של האפרוח־העובר. אולם, 'מאחר שחלמון קיים בביציות שלא הופרו, נובע מכך בהכרח שהנבט קיים לפני ההפריה'.¹¹⁸ ברור שלא תיתכן אלא מסקנה אחת: האפרוח איננו חייב את קיומו לנוזל הנתרם על־ידי התרנגול; ה'מיניאטורה' שלו כבר היתה בביצית לפני שאירעה הפריה כלשהי!

באשר לתפקידם של היצורונים שבנוזל הזרע בגנרציה – זה עדיין נשאר בלתי ברור לגמרי. בופן חשב, שלתולעים אלו יש מעין חיים אנימליים – אך לא חיים אנימליים אמיתיים – והיו טיעונים לאין ספור בדבר ה'אנימליות' של היצורונים. אך גם אם יש להם אנימליות, יצורונים בנוזל הזרע של הזכר אינם שונים מאלו הנולדים וחיים במי שלוליות. הם מצויים בכל מקום: לא רק בנוזל הזרע, אלא גם בנקבות (למשל, אצל כלבות מיוחמות), ואפילו בבשר חי, במיקפא של עגל, ובצואה. מאחר שלא נחשבו לעיקרון ההפריה של הגבר, יתכן שהיצורונים שהם משמשים גורם בהומוגניזציה של נוזל הזרע, או בעידוד משיכת הזרעים. יתכן שהם משמשים רק 'להנאה מינית'.

אפשר לחקור את תפקידו של נוזל הזרע ואת היצורונים המצויים בו בתנאים מכניים פשוטים, כלומר, של חומר וכוח. אפשר למנוע העברה של חומר באמצעים פיסיקליים, אך לא העברה של כוח.

אורגניזמים מטילי-ביצים נמצאו מתאימים ביותר לניסויים אלה, כי אפשר היה לקבל ביצים מופרות וגם בלתי-מופרות. במיוחד השתמשו בצפרדעים בשל הרגלי ההזדווגות שלהם, שבמהלכה הזכר מחבק את הנקבה מאחור, ונשאר צמוד אליה ימים רבים. בידי עוזרתו הנאמנה של ראומיר הופקדה התצפית באחד מזוגות הצפרדעים האלה, מבלי להסיר את עיניה מהם בשעת מעשה. 'היא עשתה בדיוק מה שביקשתי', תיאר זאת ראומיר. 'היא תלתה את מבטה בגבו של הזכר ולא הסירה אותו משם. כמעט מיד ראתה קילוח של נוזל שאותו השוותה לנשיפה של ענן עשן קל ממקטרת.'¹¹⁹ אולם דבר לא הוכיח, שענן העשן מילא תפקיד, ולו הפעוט ביותר, בהפריית הביצים, אשר אשכולות שלהם השתחררו באותה עת מהנקבה. אם אמנם היתה העברת חומר מהזכר לביצים, ואם אותו קילוח היה הפרשת זרע, אזי אפשר למנוע את הזרע מלהגיע לביצים וכך תישארנה עקרות. ראומיר הגה את הרעיון להלביש על הצפרדע-הזכר, לפני ההזדווגות, 'מכנסיים עשויים משלפוחית, המותאמים היטב לחלק האחורי ואוטמים אותו.'¹²⁰ אבל ההפריה לא הופרעה, מפני שהצפרדעים הצליחו לסלק את המכנסיים בעזרת רגליהם וראשנים קטנים יצאו מהביצים. ספאלאנצאני הכין מכנסיים ביתר מיומנות, והם נשאר קשורים לצפרדעים. 'הזכרים, שהיו לבושים במכנסיים, הזדווגו, אבל התוצאות של הזיווג היו כפי שנצפה מראש – אף אחת מהביצים לא התפתחה, מפני שאף אחת לא הורטבה בנוזל הזרע, שטיפות קטנות ממנו ראיתי בבירור בתוך המכנסיים.'¹²¹

באופן זה יכולים היו להשיג בנפרד כל סוג של זרע מחוץ לגופו של בעל-החיים. מכאן עלה הרעיון לערוך ניסוי של הפריה על-ידי ערבוב של שני סוגי זרע בצלוחית, כדי 'לתת חיים לבעל-חיים ממין זה, באופן מלאכותי', כתב ספאלאנצאני, 'על-ידי היקוי דרכו של הטבע בריבוי של דוחיים.'¹²² ימים מספר לאחר שהותזו בלובן הזכר, בקעו הביצים, הופיעו הראשונים והחלו שוחים סביב. בדרך זו אפשר היה לממש הזרעה מלאכותית במינים שונים של חיות – קרפדות, סלמנדרות, תולעי-משי; אפילו כלבה מיוחמת, כאשר נוזל זרע שנלקח מכלב-זכר הוזרק לרחמה.

ההזרעה המלאכותית נתנה בידי החוקרים את הכלי הדרוש לאנליזה ניסויית: פעילות שניתן לצפות בה ולמדוד אותה. עתה אפשר היה לבדוק האם אחד מהזרעים, שעבר סדרה של טיפולים מוקדמים שונים, עדיין יכול למלא את תפקידו בהפריה. וכך יכול היה ספאלאנצאני לקבוע, מהו הגורם הפעיל בנוזל הזרע של הזכר: כוח כלשהו בנוזל הספרמטי או היצורונים עצמם. נוזל הזרע של הצפרדע עדיין היה פעיל גם אחרי שטיפה שלו נמהלה בליטר מים – מה שאיננו צריך להפתיע כל־כך בהתחשב במספרם הרב של היצורונים המצויים בו. ביצים שהונחו מעל הנוזל הספרמטי מבלי שנגעו בו – לא הופרו; משמע, הנוזל פועל על־ידי מגע, וניתן עתה לבטל את הרעיון בדבר 'אד ספרמטי'. משהומתו היצורונים, על־ידי חום למשל, הזרע עדיין ניחן ביכולת הפריה של הביצים: משמע, הגורם הפעיל בזרע הזכר איננו נמצא ביצורונים, אלא ב'כוח אשר מעורר את הלב הקטן של הראשונים'.¹²³ רק האחרון בניסוייו של ספאלאנצאני היה פגום, והתוצאה לא תוקנה אלא למעלה מחצי מאה שנה לאחר מכן. ספאלאנצאני חשב, שהניסוי מאשר את נוכחות הנבט שנוצר־מוקדם מצוי בביצית, הוכחה חדשה 'שהמכונות הקטנות של העובר שייכות באופן מקורי לנקבות, והזכרים תורמים את הנוזל הקובע את תנועתן'.¹²⁴

אפילו העדות הישירה ביותר נדחתה. לאמיתו של דבר, את התפתחות העובר בביצית ניתן היה לחקור באמצעים הטכניים שהיו זמינים במאה ה-18. מה שיכולים היו לראות שם היה קשור רק בצורה ובתנועה, שכן חייבים היו לערוך הבחנה בין התפתחותו של הנבט שנוצר־מוקדם ובין ההשתכללות המתקדמת, שלב אחר שלב, של בעל־החיים הצעיר על־ידי 'אפיגנזה'. בשעה שהתבונן בהתפתחותו של אפרוח דרך המיקרוסקופ, הבחין קספר פרדריק וולף בקרומים, תחילה פשוטים ואחר־כך מקופלים, היוצרים את התפיחות, השקעורוריות והצינורות שמהם הופיעו קווי־המיתאר הכלליים של האיברים: מערכת העצבים, אחר־כך כלי־הדם, צינור העיכול וכו'. אם כן, נצפה שהמבנה הראשוני של היצור החי לא נוצר־מוקדם בביצית, אלא התארגן באופן הדרגתי על־ידי סדרה של קפלים, תפיחות ושלפוחיות, מעקובת של פעולות מכניות בזמן ובמרחב. זוהי בדיוק המסקנה שהסיק פון־באר, כחמישים שנה

לאחר מכן, בשעת תצפיות דומות. אף-על-פי שבמאה הבאה עתיד היה ספרו של וולף *Theoria generationis* לשמש בסיס לאמבריוולוגיה ניסויית, הרי במאה ה-18 התעלמו ממנו כמעט כליל. לא היתה שום מסגרת שלתוכה אפשר היה להכניס אפיגנזה, שום פתרון אחר לסוגיית הגנרציה של יצורים חיים, אלא רק זה של היווצרות-מוקדמת.

תורשה

אנשי-המדע במאה ה-18 אמנם לא יכלו לזנוח את הרעיון בדבר קיום-מוקדם והיווצרות-מוקדמת, אולם בכל זאת הראו את מגבלותיהן של תיאוריות אלו. די היה בחישוב פשוט. בופון חישב, שנבט יחיד קטן פי אלף מיליון מאדם: אם גודלו של אדם נלקח כיחידה בסיסית, הרי גודלו של הנבט יבוטא כ- $1/1,000,000,000$ שלו, כלומר על-ידי 'מספר בן 10 ספרות', הנבט מדור הנבטים השני על-ידי 'מספר בן 19 ספרות', ובן הדור השישי על-ידי 'מספר בן 55 ספרות'. אולם בהשוואה עם גודל מרחב היקום 'משמש עד שבתאי' – בהנחה שהשמש גדולה פי מיליון מהארץ ורחוקה משבתאי מרחק הגדול פי אלף מקוטר השמש – גודלו של האטום הקטן ביותר שניתן לראות דרך המיקרוסקופ יבוטא על-ידי מספר בן 54 ספרות. הנבט של הדור השישי יהיה איפוא קטן מהאטום הקטן ביותר האפשרי! מגוחך, הסיק בופון.¹²⁵

השובות ביותר נעשו גם תופעות הרגנרציה – היכולת של בעלי-חיים מסוימים ליצור גוף שלם מחלקים – כמו התולעת הימית שחקר בונה, או ההידרה שצפה בה טרַמְבֶּלִי. כמו עץ המצמיח ענפים, 'פוליפ' זה, הגדל במים מתוקים, בעל זרועות הדומות לקרניים' מצמיח פוליפים צעירים, ההולכים וגדלים וניתקים מההורה, והם עצמם, בתורם, יוצרים פוליפים צעירים. יכולים לחתוך פוליפ, לפרקו למיקטעים, לקצצו כביכול: בתוך שניים שלושה שבועות כל חלק יוצר פוליפ חדש ומושלם, שממנו ינצו פוליפים קטנים. באותו אופן, 'רגליו' של סרטן, זרועותיה של סלמנדרה ואפילו ראשו של חילזון שבים וגדלים לאחר שנחתכו.

יתרה מזו, אם נחתכה רגלו של הסרטן קרוב לגוף או בקצה, אם סולקה כל הזרוע או רק חלק ממנה, תמיד חוזר וגדל בדיוק החלק החסר. איך ניתן ליישב כל זאת עם היווצרות־מוקדמת: האם אמור האורגניזם הקטוע לגשת אל אחד מצאצאיו הפוטנציאליים ולשאול ממנו את החלק החסר? לדעת ראומיר צריך להניח, ש'על רגלו של סרטן אין שום מקום ללא ביצית המכילה רגל נוספת; ומה שעוד יותר מופלא, מדובר בחלק של הרגל הדומה לחלק שבו ממוקמת הביצית בקצה האיבר.¹²⁶ זאת ועוד: משחזרה הרגל וצמחה, ניתן לשוב ולחתוך אותה, ורגל אחרת תשוב ותיווצר. וגם הרגל החדשה, כמו הראשונה, צריכה תהיה להכיל מספר אינסופי של ביציות כדי להתליף בדיוק את אותם החלקים של הרגל שעלולים להיות מסולקים ממנה.

ולבסוף, היו כמובן תופעות התורשה. עד לאותה תקופה, קווי־דמיון בין בני משפחה לא הטריד יתר על המידה את המצדדים בהיווצרות־מוקדמת. תמיד אפשר היה להסביר שאם הילד מקבל מאפיינים שונים משני ההורים, הרי זה בגלל כוח משפעל או מזין כלשהו. אולם הסדירות שבקווי־הדמיון היא שהחלה לעורר תשומת־לב. כשגבר שחור נושא אשה לבנה, שני הצבעים מתערבבים תמיד: צבע עורו של הילד הנולד תמיד שחום. הילד יורש תמיד מאפיינים מסוימים מהאב ואחרים מהאם – גובה, מבנה פנים וכמה אופיינים פיסיים ומוסריים. הוא הדין בבעלי־חיים: כשהזדווגות של חמור וסוסה נושאת פרי, לא נוצר חמור וגם לא סוס, אלא תמיד תערובת של השניים. איך ניתן ליישב קיום־מוקדם והיווצרות־מוקדמת עם נסיבות בלתי־צפויות של הזדווגות? כפי ששאל מופרטואי: 'היהיו לעיר, אשר כבר נוצר בשלמותו בביצית הסוסה, אוזניים של חמור מכיוון שתמור הוא שחולל תנועה בחלקי הביצית?'¹²⁷ מגוחך, הסיק מופרטואי.

ובכל זאת, אף־על־פי שתופעות התורשה החלו מקבלות חשיבות חדשה במאה ה-18, הן עדיין היו מושאי תצפית ולא מושאי ניסוי, לפחות בבעלי־חיים. כל עוד נולדו היצורים החיים כצירופים של יסודות נראים, ניתן לצפות רק לסידור־מחדש של היסודות האלה בעקבות הצלבה בין בעלי־חיים בעלי תכונות אופייניות השונות

לגמרי זו מזו. אף-על-פי שמושג המין ביטל כל אפשרות של הופעת ילד בעל פני כלב או רחלה בעלת זנב-דג – עולם-החי עדיין היה רציף; עדיין יצר מארג שלם, שהכול בו מדורג ובעל דקויות. הגבול שהציב הטבע על הזדווגות מינית בין החיות נשאר בלתי-מוגדר. אולם אפשר היה לנסות ולאמת שמועות שעדיין היו נפוצות בדבר התוצרים של הזדווגויות אסורות בין בעלי-חיים הנמנים עם מינים קרובים. למשל, היווצרות של בעלי-חיים מוזרים, שלפי הדעה המקובלת היו תוצאה של הזדווגות בין שור לסוסה, בין פרה לחמור או בין שור לאתון. או גם, איחוד של כלב וחתולה, או תרנגולת וברווז. שארל בונה הציע שספאלאנצאני ישים 'כלב ספנייל מיוחם בחברת ארנבת'.¹²⁸ ראומיר כלא בארון תרנגולת עם ארנב 'אשר נהג בתרנגולת כפי שהיה נוהג בארנבת, והתרנגולת הניחה לו לעשות כל דבר שהיתה מרשה לתרנגול לעשות'.¹²⁹ אך למרות סימני החיבה של 'הארנב הגלהב' ו'החיבה הרבה שגילו שתי חיות "מאושרות" אלו זו לזו', הביצים שהטילה התרנגולת היו עקרות, למרבה צערן של ראומיר. ובכל זאת, כל הניסויים הבלתי-מוצלחים האלה חיזקו את הרעיון שצאצאות היא אכן הבסיס שעליו יש לכונן את רעיון המין.

בגלל הכשלונות האלה מיקד ראומיר את מאמציו בזיווג בעלי-חיים בני אותו המין, שיש הבדלים ברורים בתכונות מבנה מסוימות שקל להבחין בהן אצל בעלי-חיים אלה. הוא השיג תרנגולות משגי סוגים, כאלה 'שגבדלו מכל השאר מפני שהיה להן חלק נוסף, למשל, ציפורן ארוכה מאוד', ואחרות שבהן 'חסר חלק ניכר וברור, למשל, כרבולת'.¹³⁰ עם בעלי-חיים אלה תיכנן ראומיר ניסוי שבו יוצלבו טיפוסים שונים בהתאם ל'צירופים' שונים. הוא הסביר שאפשר להצליב תרנגולת בעלת חמש ציפורניים עם תרנגול בעל ארבע ציפורניים, ולהיפך; באופן דומה אפשר להצליב פרטים בעלי כרבולת וחסרי כרבולת. אם יבקעו אפרוחים מהצלבות אלו, העובדה שהיתה להם כרבולת או לא 'צריכה להראות לנו האם הנבט היה שייך באופן מקורי לנקבה או לזכר'. המקוריות של תוכנית זו היתה טמונה ברעיון לבדוק, על-ידי הצלבה, את ההתנהגות של תכונה אופיינית אחת או שתיים, ולא במספר רב של תכונות כאלה. גישה זו היא שאיפשרה למנדל, כעבור למעלה ממאה שנה, לייסד

את מדע התורשה. אולם ראומיר, שאמנם הגה את תוכנית ההצלבות הללו, מעולם לא חזר להתייחס אליהן, וגם לא הזכיר אם מימש אותן או מה היו תוצאותיהן. שוב היה זה בצמחים, מרגע שהתגלתה בהם עדות על תופעות מיניות, שהצליחו ליצור כמה בני-כלאיים. התברר שהללו נשאו תכונות אופייניות של שני ההורים. יש להם טבע-ביניים, אמר קלרויטור, 'ממש כשם שעם איחודם של מלח חומצי ומלח בסיסי נוצר מלח שלישי, שהוא נייטרלי'.¹³¹ כמה מבני-הכלאיים האלה היו פוריים. ותכונות אופייניות מסוימות של ההורים הופיעו בצאצאים במשך הדורות. כל זה לא עלה בקנה אחד עם היווצרות-מוקדמת.

מה שלא יכלה המאה ה-18 להשיג בניסויי בבעלי-חיים, היא השיגה בתצפית בבני-אדם. כל הפנטזיות בדבר תוצרים של זיווג של אדם עם מינים אחרים אמנם לא נשכחו, אבל היה קל וברור יותר להבחין בצורות חריגות באדם מאשר בבעלי-חיים. תצפית כבר לא הוגבלה איפוא אך ורק לעריכת רשימה של תכונות מבנה של הילד המזכירות בו את האב, או את האם, או את שניהם. אלא תצפיות הפכו להיות חקירה ודרישה באילן הגיניאלוגי שלו, שבמהלכן עקבו אחר תופעות אנטומיות חריגות במשך כמה דורות, עד כמה שניתן הדבר. מופרטואי מציג מקרה:

יעקוב רוֹהָה, מנתח מברלין, נולד עם שש אצבעות בכל כף יד ובכל כף רגל; הוא קיבל תופעה חריגה זו מאמו, אליזבת רוהה, שקיבלה אותה מאמה אליזבת הורסטמן מרוסטוק. אליזבת רוהה העבירה אותה לארבעה משמונה הילדים שילדה ליאן-כריסטיאן רוהה, שלא היה שום דבר יוצא מגדר הרגיל בכפות רגליו או בכפות ידיו. יעקוב רוהה, אחד מהילדים שהיו להם שש אצבעות, נשא לאשה את סופי-לואיז מתונגן שליד דנציג ב-1733, אשה ללא כל מאפיינים יוצאי דופן; היו להם שישה ילדים; לשני בנים היו שש אצבעות. לאחד מהם, יעקוב ארנסט, היו שש אצבעות ברגלו השמאלית וחמש בימנית, בידו הימנית היתה לו אצבע שישית שחתכו אותה; בשמאלית, היתה לו רק יבלת במקומה של האצבע השישית. מתוך אילן גיניאלוגי זה, שאחריו עקבתי באופן מדויק, נראה כי שש-אצבעיות מועברת על-ידי האב והאם כאחת.¹³²

אותה אנומליה נצפתה במשפחה ממלטה, שתוארו אותה ראומיר¹³³

ושארל בונה.¹³⁴ גם שם הביאו תוצאות החקירה לאותן מסקנות. שפת המתמטיקה ושיטותיה ניתנות איפוא ליישום גם בתופעות התורשה. כדי להוציא מכלל חשבון את השפעתה של המקריות על החזרה של אי־נורמליות אנטומית זו בתוך משפחה אחת, מופרטואי הסתמך על חישוב של הסתברויות. בעיר בת 100,000 תושבים גילה החיפוש רק שני אנשים אשר להם שש אצבעות.

הבה נניח – אף כי אין הדבר סביר – כי שלושה נוספים חמקו מתשומת־לבי וכי בין כל 20,000 איש יש אדם אחד בעל שש אצבעות; ההסתברות שלבנו או לבתו יהיו שש אצבעות היא 20,000 ל-1; ההסתברות שלבנו ולנכדו יהיו שש אצבעות היא 20,000 כפול 20,000, או 400,000 ל-1; לבסוף, ההסתברות שחריגות זו לא תתמיד בשלושה דורות רצופים היא 8,000,000,000 ל-1; מספר שהוא כה גדול, עד שאפילו הוודאות של הדברים המדויקים ביותר בפיסיקה אינה מתקרבת לדרגת הסתברות זו.¹³⁵

בדברו על היצורים החיים השתמש הפיסיקאי בשפת החישוב וההיסק שהשתמש בה בדברו על האובייקטים הדוממים. אם חוקי המקריות תקפים כאן, אין להתעלם מהם שם.

*

במאה ה-18 עבר חקר היצורים החיים בהדרגה מרופאים אל מקצוענים מטיפוס חדש – חוקרי־טבע. אולם עדיין לא רכש את מלוא עצמאותו, לא מצא שיטות ומושגים ואף לא שפה משלו. מצד אחד, תוצאות המיון הכניסו סדר בתוהו־וּבוהו של הצורות הנראות; ומצד אחר, ההתקדמות שנעשתה על־ידי הפיסיולוגיה החלה מגלה סדר במעמקי היצורים. אך הסדר הנראה וגם הסדר החבוי עדיין השתייכו לתחומים שונים; עדיין לא היתה כל נקודת־מגע ביניהם. חקר תולדות־הטבע במאה ה-18 יצר פרסקו, מיתאר דו־ממדי, תרשים שבתוכו ניתן להציב את עולם־החי. רק בשלהי המאה ה-18, ובמיוחד במאה ה-19, עמד האורגניזם לרכוש מימד ועומק חדשים. ואז צריך היה לכונן יחסים חדשים בין שטח־הפנים של יצור ובין חלקו הפנימי, בין האיבר לתיפקודו, בין הנראה לבלתי־נראה.

עם מושג הגרציה, לא יכלו היווצרותו של יצור חי וגם לא התמד המין להתחמק מסיבות תכליתיות. אף לאחר שחל שינוי בגישה, אשר הוציאה את התנעתו של העולם מידי כוחות טמירים והפקידה אותה בידי חוקי הטבע; אף לאחר שחוקים אלה נעשו אחראיים להתפתחות הנבט, עדיין היה צורך להזדקק לבריאה אינדיבידואלית לכל יצור: בעבר, בהווה או בעתיד. אולם ההזדקקות לקיום־מוקדם של נבטים היתה בדרך כלשהי הכרה באי־האפשרות להסביר גרציה אך ורק עלידי השפעתם של חוקי התנועה, הפועלים על חומר סביל. בכל התקופה הקלאסית, שיטות המדע הניסויי שנעשה בהן שימוש בפיסיקה, כמעט לא יושמו לעולם־החי, שעדיין שלטו בו אנקדוטות, דעות ואמונות תפלות. אף־על־פי שעם חלוף השנים קשר מושג המין ביחד דומה לדומה, עדיין לא הוגדרו גבולותיו כראוי. מפלצות רבות נעלמו, אך לא כולן. למרות מאמציו של ראומיר, עדיין נשאר אותן 'תשוקות מכוערות', שתיאר וולטיר, אשר גרמו לסידור־מחדש של איברים, של יצורים דמיוניים, ושל גיניאלוגיות מוזרות. באשר להכלאות, הגבול בין האפשרי לבלתי־אפשרי עדיין נשאר מעורפל. אולם בה בשעה, הדוגמה של הפיסיקה וההצלחות באיחוד המכניקה של השמים עם המכניקה של הארץ הגבירו את משקלם של תצפיות וניסויים בפענוח הטבע. היתה נטיה גוברת לאמץ את הגישה שנקט ניוטון במבוא לספרו *Opticks*: 'מטרתי בספר זה איננה להסביר את תכונות האור עלידי היפותזות, אלא להציגן ולהוכיחן בעזרת היגיון וניסויים'.¹³⁶ הלוגיקה של מערכות אפריורי הוחלפה עלידי לוגיקה של עובדות. ובחקר עולם־החי – עובדות מסוימות, כמו רגנרציה של תולעים ופוליפים או הדמיון בין ילד לאביו וגם לאמו לא התאימו להימצאותו של יצור שנוצר־מוקדם בנבט.

המושג 'רביה' נולד מכל התצפיות הללו. המלה הזאת שימשה תחילה לציון תופעות הרגנרציה של גפיים קטועות בבעלי־חיים מסוימים. החלק ששב וצמח הוא החלק שהיה קיים לפני הקטיעה. אם נחתכת רגלו של סרטן, מתרחשות ברגל ר־גנרציה, ר־פורמציה ור־פרודוקציה. המונח הופיע כנראה לראשונה בספר זכרונותיו של ראומיר, שיצא לאור ב-1712, בין העבודות האחרות של האקדמיה למדעים,¹³⁷ תחת השם 'על אודות רביה מסוגים שונים המופיעה

בסרטנים למיניהם... וכו', ובין השאר, זו של רגליהם וקונכייתיהם'. מובן זה עתיד להתקיים בכל המאה ה-18, במיוחד בעבודותיו של שארל בונה. בערך 'רביה' ב-*Grande Encyclopédie* או מוצאים: 'רביה משמעה, בדרך-כלל, רביה של דבר שהתקיים לפניכן ונהרס מאז. דוגמה: רביה של רגלי סרטן'. אולם נראה שבופן הוא שעשה שימוש נרחב יותר במונח. בספרו *Histoire naturelle des animaux*, שיצא לאור ב-1748, הוא משתמש במונח 'רביה' לא רק להיווצרות מחדש של חלקים קטועים, אלא גם לגרציה של בעלי-חיים. הפרק השני, 'על-אודות רביה באופן כללי', פותח במלים: 'הבה נבחן מקרוב יותר את התכונה הזאת, המשותפת לבעלי-חיים ולצמחים, יכולת זו ליצור את הדומה, שרשרת זו של קיומים רציפים של פרטים-יחידים, המהווים את הקיום האמיתי של המין.¹³⁸ מאחר שהיה קשור למושג המין, החלו הכול משתמשים במונח 'רביה'. אף-על-פי שהערך 'רביה' ב'*אנציקלופדיה הגדולה*' עדיין נתן את המשמעות של היווצרות-מחדש של צבת חסרה אצל סרטן, בערך 'גנרציה' כתוב: 'המונח הזה משמעו בדרך-כלל יכולת הרביה, המיוחסת ליצורים מאורגנים'. אפילו מצדדים מושבעים של היווצרות-מוקדמת דיברו על רביה. שארל בונה, למשל, כינה פרק אחד בספרו *Palingénésie philosophie* – 'מאפיין נוסף של מצוינות המכונות המאורגנות. הרביה של סוגים שונים'.¹³⁹ אף-על-פי שהמונח 'רביה' התקבל בדרך-כלל, לא היתה לו אותה משמעות כמו בעיני בופן. עבור האלר, שארל בונה, ספאלאנצאני ורוב החוקרים בשלהי המאה ה-18, ואפילו בתחילת המאה ה-19, היצורים החיים נולדו תמיד מנבטים שנוצרו מוקדם.

בופן, כמו מופרטואי, חיפש אחר פתרון חלופי להיווצרות-מוקדמת, כדי להסביר בעת ובעונה אחת הן היווצרות של דומה מדומה, הן רגנרציה של חלקים חסרים והן תופעות של תורשה דו-צדדית. מעבר לרבגוניות הנראית לעין של אופני הגנרציה, מופרטואי ביקש לגלות 'את תהליכו הכלליים של הטבע בזמן שהוא יוצר ומשמר'.¹⁴⁰ לדידו של בופן, הדבר החשוב היה לגלות, מעבר לדברים היחודיים, את 'המנגנון שהטבע משתמש בו, כדי לבצע רביה'.¹⁴¹ ומנגנון זה יכול היה להיות אך ורק מנגנון חבוי. לא

היתה כל דרך להסביר רביה על-ידי הַתְּמַד המבנה הנראה. מופרטואי, כמו בופון, נזקקו למבנה סודי מסדר גבוה יותר, כדי לקשור יחד ולארגן את החלקים הנראים. מאחר שעמדה לרשותם המכניקה הגניוטונית בלבד, ומאחר שלא היו טכניקות ומושגים מתאימים (אשר לא הופיעו אלא במאה הבאה), נסיונות אלה גידונו לכישלון. אולם הרעיון של רביה, החיפוש אחר מכניזם משותף לכל היצורים החיים, הצורך לחדור אל מעבר לשטח־הפנים הנראה ולהגיע אל הארגון החבוי – כל אלה העלו תרומה שאיפשרה לכונן מדע חדש: ביולוגיה, מדע החיים.

ארגון

כל עוד נתפשו יצורים חיים כצירופים של מבנים נראים, היווצרות מוקדמת היתה האמצעי הפשוט ביותר לקבוע את המבנים האלה בקו הדורות. הרציפות הליניארית של עולם החי במרחב ובזמן הצריכה רציפות של צורות במשך תהליכי הגרציה עצמם. תפקידה של הגרציה היה להנציח את הסדר הנראה. המין ייצג מעין ישות נוקשה, מסגרת קבועה, שלתוכה הותאם הפרט היחיד. לפיכך, צאצאות צריכה היתה להיות בעלת אותה איגרציה כמו המערכת כולה.

במחצית השניה של המאה ה-18 ובתחילת המאה ה-19 החל להשתנות בהדרגה טבעה של הידיעה האמפירית עצמה. ניתוח והשוואה נטו לעסוק לא רק ביסודות המרכיבים את המושאים, אלא גם בקשרים הפנימיים ביניהם. בתוך הגופים החיים עצמם חייבת היתה להימצא האפשרות לעצם קיומם. פעולת הגומלין בין החלקים היא שנתנה לשלם את משמעותו. יצורים חיים היו איפוא מיקבצים תלת-ממדיים שבמעמקיהם הסתדרו המבנים בהתאם לסדר שתיפקודיות האורגניזם כולו הכתיבה מראש. שטח הפנים של יצור נשלט על-ידי מה שחבוי במעמקיו, האיברים של הנראה נשלטו על-ידי התיפקודים של הבלתי-נראה. מה ששלט בצורתו, בסגולותיו ובהתנהגותו של יצור חי היה הארגון שלו. ארגון הוא שהבדיל את היצורים מן הדברים, את החי מן הלא-חי. ברמת הארגון נוצר המיפגש בין איברים לתיפקודים. ארגון הוא שקיבץ

יחד את חלקיו של האורגניזם לשלם, איפשר לו להתמודד עם תביעות החיים ופיזר את הצורות ברחבי עולם-החי. ארגון היה כביכול מבנה מסדר גבוה יותר, אשר לו יוחסו כל התכונות הנתפשות של היצורים. במעבר מן המאה ה-18 אל המאה ה-19 עמד איפוא להופיע מדע חדש, אשר מטרתו כבר לא היתה סיווג היצורים, אלא ידיעת החי, אשר מושא הניתוח כבר לא היה המבנה הנראה, אלא הארגון.

זיכרון ותורשה

כבר במחצית המאה ה-18 כונו יצורים חיים בדרך-כלל 'יצורים מאורגנים' או 'גופים מאורגנים'. אולם המושג 'ארגון' ציין אך ורק דרגת מורכבות גבוהה במיוחד במבנים הנראים, בסידור היסודות המרכיבים את הגופים. את קיומו של מבנה חבוי גאלצו להניח רק בעזרת הייצוג הגניוטוני של היקום הפיסיקלי. על-פי מכניקת החומר של גיוטון, מתחת למערכת-המצורפת הנראית של שטחי-פנים ונפחים מצויה מערכת-מצורפת סודית של חלקיקים, המרכיבים את החומר. מה שנותן איכויות פנימיות לגופים, ותכונות לחומרים, איננו אך ורק טבעם של האטומים המרכיבים אותם, אלא גם היחסים של משיכה או זיקה הקיימים בין האטומים האלה. סגולותיהם של היצורים נקבעו איפוא בהכרח על-ידי החלקיקים המרכיבים אותם ועל-ידי הקשרים הקיימים ביניהם. ביצורים מאורגנים, בדיוק כמו בדברים דוממים, המבנה הנראה נסמך על סידור של חלקיקים, שמאחדת אותם פעולתו של כוח, שניתן להשוותו למשיכה של הכבידה, המעניקה לכידות לשלם.

הדעה שיצורים חיים מורכבים מיחידות-יסוד הופיעה בתדירות הולכת וגוברת בכתבים של החוקרים במחצית השניה של המאה ה-18. לדעת הפיסיולוג האלר¹, שניסה לנתח את המירקם והתיפקודיות של שרירים ועצבים, יצור 'מורכב בחלקו מסיבים ובחלקו ממספר אינסופי של לוחיות קטנטנות, אשר בגלל מיקומן באתרים שונים תוחמות חללים קטנים, יוצרות אזורים קטנים ומאחדות את כל חלקי הגוף'. הסיב הוא יחידת-היסוד הבונה גופים

מאורגנים. הסיב מייצג לפיסיולוג מה שהקו מייצג לגיאומטריקן. 'הסיב הקטן ביותר, או הסיב הפשוט, 'כשם שתובנה, ולא דווקא החושים, היא העוזרת לנו לתפוש',² מייצג כביכול את הגבול התיאורטי של הניתוח האנטומי, שאותו ניתן לקבוע על-ידי הפרדה בין שרירים, עצבים או גידים בחודו של איזמל מנתחים. יש רק סוג אחד של סיב ליצירת כל האיברים. אותם סיבים ארוגים שתיזערו לכל עבר במארג רצוף, המחבר את חלקי הגוף ביחד. מה שהעניק לאיבר יציבות או גמישות, נוקשות או קפיציות הוא אופן אריגת הסיבים זה בזה, צפיפותו או דלילותו של המארג וכמות הנוזלים שהוא מכיל. לסיבים כבר יש מבנה מורכב, ואיחודם מחדש הוא הנותן לאורגניזם את תכונותיו. 'את הסיב הקטן ביותר, קבע שארל בונה,

ואפילו את הסיב הזעיר ביותר אפשר לדמיין כמכונות זעזעורות עד מאוד, בעלות תיפקודים משל עצמן. המכונה השלמה, המכונה הגדולה, היא איפוא תוצאת ההקבצה של 'מכונות קטנטנות' רבות לאין ספור, שפעולותיהן מתרחשות יחד או מתלכדות יחד למען תכלית משותפת.³

אולם הדעה שיצורים מורכבים מיחידות-יסוד ייצגה דרישה של הלוגיקה ולא דווקא של האנטומיה. גביש של מלחים, הסביר בופון, הוא קוביה הבנויה מקוביות אחרות, ואין ספק שהחלקים הראשוניים והמורכבים של מלח גם הם קוביות. באותו אופן,

בעלי-חיים וצמחים היכולים להכפיל את כל חלקיהם ולהתרבות הם גופים מאורגנים המורכבים מגופים אורגניים אחרים דומים, שחלקיהם הראשוניים והמורכבים גם הם אורגניים ודומים, ואותם אנו רואים בעין בלתי-מזוינת כשהם מקובצים במסות גדולות, אך את חלקיהם הראשוניים איננו יכולים לתפוס אלא רק בדרך ההיסק והאנלוגיה.⁴

צמצום האורגניזמים לאוסף של יחידות נגזר איפוא ישירות מתיאוריית החלקיקים של החומר, ובמידה מסוימת אף השלים את התיאוריה הזאת. יחידות-היסוד, המרכיבות את היצורים המאורגנים, כונו בשם 'חלקיקים חיים' בפי מופרטואי ו'מולקולות אורגניות' בפי בופון. לדעת שני החוקרים, התפקיד שמשחקות

היחידות האלה ביצורים דומה לזה של האטומים במושאים דוממים. ממש כשם שסידור האטומים מקבע את צורתם וגם את איכויותיהם של המושאים הדוממים, כן סידור החלקיקים החיים קובע את צורתם ואת תכונותיהם של היצורים. כמו האטומים, יחידות אלה, שאמנם אינן נראות לעין אבל הלוגיקה אינה יכולה לדחותן, מייצגות את הגבול הסופי של כל גיתות. כמו האטומים, היחידות החיות קשורות על-ידי כוח, הקרוי 'משיכה' בפי הפיסיקאים ו'זיקה' בפי הכימאים, כוח הנותן ליצורים ולאובייקטים הדוממים את לכידותם. כשם שאי-אפשר להרוס אטומים, כן אי-אפשר להרוס את היחידות האלה. ובכל זאת, יחידות אלה אינן אטומים. הן חלקיקים מטיפוס מיוחד, השמור ליצורים חיים בלבד. בסופו של דבר, ההרכב של היצורים מובחן מזה של האובייקטים הדוממים רק על-פי טבעם של רכיבי-היסוד שלהם. כאשר יצור מאורגן מת, החלקיקים המרכיבים אותו אינם פְּלִים. הם פשוט נפרדים זה מזה ונעשים זמינים ליצירת צירוף חדש, להרכבת יצור חדש. חלקיקים חיים אלה קיימים בכל מקום בטבע. הם נבלעים או נשאפים על-ידי אורגניזמים, הממיינים את המולקולות האורגניות ודוחים את 'המולקולות הגסות'. החלקיקים החיים משתתפים תחילה בגדילת האורגניזם; ומשהתבגר האורגניזם, העודף משמש ליצירת הזרע לצורך הרביה. 'נוזל הזרע של כל מין', אמר מופרטואי, 'מכיל חלקים רבים לאין ספור, היכולים ליצור, על-ידי התקבצותם יחד, בעלי-חיים מאותו מין'.⁵

שכן, לדעת מופרטואי כמו לדעת בופון, הרביה של יצורים חיים וההרכב היסודי שלהם הולכים ביחד. להסברת הגנרציה בדרך שונה מהיווצרות-מוקדמת, חייבים היו להזדקק לסדר חבוי, המצוי מעבר לסדר הנראה, ולחדול מלהתייחס אל האורגניזם כאל שלם שלא ניתן להפרידו לחלקים, אלא כאל מיקבץ של 'חלקים ראשוניים בלתי ניתנים להריסה', שניתן לאחדם יחד או להפריד ביניהם. לדעת בופון, 'ההתאספות של חלקים אלה מופיעה לנגד עינינו כיצורים מאורגנים, ולפיכך הרביה או הגנרציה הן רק שינוי צורה, המתרחש ומתמשש על-ידי הוספה פשוטה של חלקים דומים, ממש כשם שהריסתו של יצור מאורגן נעשית על-ידי התפרדותם של אותם חלקים עצמם'.⁶ יצירתו של יצור חי איננה 'עולה' בחומרים:

הטבע פשוט מסדר מחדש את אותן יחידות הנעשות זמירות עם מותם של אורגניזמים אחרים. מה שמועתק בדמות ההורים בשעת הגנרציה של יצורים מאורגנים הוא הסידור של מולקולות אורגניות, המערך של יחידות המיוחדות למין, כלומר, הארגון.

אולם אם גם יכלו חוקרי המאה ה-18 למצוא במבנהו החלקיקי של החומר את המוצא מן המבוי הסתום של היווצרות-מוקדמת, הרי עדיין לא עמדו לרשותם המושגים וגם לא האמצעים הטכניים שיאפשרו להם לחקור את המבנה החבוי, שאת קיומו הניחו. למשל, היתה בהכרח זהות בין המולקולות שהרכיבו את ההורים ובין אלו שהרכיבו את הזרע, ששימש ליצירת הילד. כל זרע הכיל טווח מלא של טיפוסים החלקיקים השונים, שנדרשו ליצירת האיברים השונים. משמע, כל חלקי הגוף צריכים היו להשתתף ביצירת הזרע, כל אחד תרם את המולקולות האופייניות לו. 'ניסוי עשוי אולי לשפוך אור על נקודה זו', אמר מופרטואי. 'אם ננסה להטיל מום בבעלי-חיים כלשהם דור אחר דור במשך תקופת זמן ארוכה, יתכן שהחלקים הקטועים ילכו ויקטנו בהדרגה, ולבסוף אולי ייעלמו כליל.'⁷ ניסוי זה כבר נעשה, השיב חסיד היווצרות-המוקדמת שארל בונה: בשבטים מסוימים, שם נהוג לכרות אשך אחד מכל זכר, כל הבנים נולדים עם שני אשכים.⁸

כוח המשיכה הוא המקבץ את חלקיקי הזרעים ליצירת הילד. כל חלק של הילד נוצר על-ידי איחוד מחדש של חלקיקים מאותו טיפוס, אשר בבואם מהאב ומהאם מכירים זה את זה ומתאחדים בגלל הזיקה הרבה בין מולקולות בעלות טבע דומה. היו שניסו לראות במשיכה זו בין חלקיקים דומים הבאים משני ההורים ראיה מקדימה על הזיווג היחודי שגילו הגנטיקאים במאה ה-20 בין כרומוזומים הומולוגיים. אולם במאות ה-18 וה-20 דנים בעניינים שונים. לדעת הגנטיקאים, ההתחברות של תכונות נורשות זו לזו וההתפלגות מחדש שלהן במהלך הדורות מתבצעות על-ידי גורמים עצמאיים, השולטים בביטוי התכונות האופייניות, בעוד הם עצמם נשארים מובחנים מהן בטבעם ובתפקידם כאחד. לעומת זאת, לדעת מופרטואי, אין החלקיקים שבזרע מובחנים מאלה המרכיבים את גוף האורגניזם וקובעים את תכונותיו האופייניות. כל זרע מכיל

בעיקר חלקיקים הזהים לאלה המרכיבים את גופם של המולידים. לכן טבעי שהילד דומה להוריו: הוא מורכב מחלקיקים זהים. שהרי אותם חלקיקים חוזרים ומופיעים בזרע בכל דור ודור, התכונות מונצחות על-ידי צאצאות. אולם 'המקרה, או תָּסֵר בתכונות משפחתיות, יוצרים לפעמים מיקבצים אחרים.⁹ צירופים מקריים כאלה אחראים לצאצאים מוזרים: למשל, הופעת מפלצות, או ליצירתה של תכונה חדשה כמו הופעה של ילד לָבָן אצל זוג שחור. אולם גם אם יכלו חוקרי המאה ה-18 להעלות על דעתם שקיים סדר סודי השולט בצורתו ובתכונותיו של יצור חי, הם לא יכלו לדמיין רמות מבנה שונות. הם לא ערכו כל הבחנה בין 'צורנות משפחתית', חלקיק התומר המרכיב את הגוף וקובע את הצורנות המיוחדת הזאת, ובין חלקיק הזרע הקובע את הרבייה.

ובכל זאת, חוקרי המאה ה-18 תפשו בבהירות את אחת הדרישות שכופה כל מערכת שהיא, שהרי בכל דור צורת ההורים נוצרת מחדש בילד על-ידי התקבצות יחידות-היסוד: זהו הצורך בהתערבות של 'זיכרון', שידריך את התקבצות החלקיקים. בעיה זו לא התעוררה כל עוד היווצרותם של כל הנבטים יוחסה לבריאה שהיא סימולטנית; לדעת חסיד תיאוריית ההיווצרות-המוקדמת, ה'זיכרון' הנחוץ לשימורו של המבנה-הנראה במהלך דורות רצופים הוא למעשה מבנה זה עצמו. אבל משעה שהשתרשה הדעה, שהחלקיקים צריכים לשוב ולהתחבר בכל דור בדמות ההורים, צריך היה להעלות השערה בדבר האמצעי שבזכותו דמות זו משתמרת במהלך דורות רצופים. הוצעו שני פתרונות אפשריים לבעיה זו. לדעת מופרטואי, חסידו של לייבניץ, הזיכרון המכוון את החלקיקים החיים, כדי ליצור את העובר, והזיכרון המנטלי הם היינו הך. לחומר יוחס איפוא לא רק זיכרון, אלא גם 'אינטלקט, תשוקה או סלידה'.¹⁰ החלקיקים החיים נמשכים זה אל זה על-ידי הזיקה ביניהם, אך רק הזיכרון שהם ניחנים בו יכול להסביר את מקומם בעובר. כל חלקיק 'משמר את זְכָר מקומו הקודם ויחזור לאותו מקום כל אימת שיוכל, כדי ליצור את אותו חלק בעובר'.¹¹

לדעת בופון המטריאליסט, לעומת זאת, לא סגולה המשותפת לכל גרגר של חומר היא המשמרת את דמות ההורים בגנרציה וקובעת

את מקום המולקולות האורגניות בילד, אלא מדובר במבנה מיוחד. החלקיקים אינם יכולים ליטול את צורת ההורים ללא מודל שידריך אותם, ללא תבנית שתיתן להם צורה. 'באותה דרך שאנו יכולים לעשות תבניות, כדי לצור כרצוננו את המבנה החיצוני של גופים, הבה נניח שהטבע יכול לעשות תבניות שבהן הוא צר לא רק את הדמות החיצונית אלא גם את הדמות הפנימית.¹² הלוא בשעה שיצור חי מתרבה, 'מועתקים' לא רק מיקבץ של קווים, שטח־פנים ונפחים היוצרים את הדמות הנראית, אלא גם המערך הפנימי – המבנה החבוי של איברים השולטים בתיפקודיות של הגוף החי. מכאן שההתרבות של יצורים חיים דורשת מה שבפון כינה בשם 'תבנית פנימית',¹³ הדרך היחידה 'לחקות את פנים הגופים'. בני־זמנו של בופון, וגם בני הדורות הבאים, לעגו לעתים קרובות על הערה זו. אולם למעשה תפש בופון בבהירות ואף ניתח את אחד הקשיים העיקריים בהסברתן של התרבות וגדילה, קושי שרק לאחרונה התגברו עליו בעזרת הביולוגיה המולקולרית. אפשר להעתיק מבנים במימד אחד או בשני ממדים, אך לא בשלושה. בופון השתמש במודל של התבנית כאמצעי להסביר את דעתו, משום שהדרך המקובלת ביותר ליצור גוף תלת־ממדי היא דרכו של הפּסָל, המשתמש בטביעה שהשאיך הגוף בשעווה או בגבס. אך השעווה יכולה 'לתפוש' רק את שטח־הפנים של החפץ. אין היא יכולה 'לגעת' בשום דבר המצוי מתחת לשטח־הפנים, והיא מתעלמת ממה שקורה בתוך החפץ. התבנית מעתיקה איפוא אך ורק את שטח־הפנים של האובייקט; מובן שבזמן ההעתקה אין מכתיבים כל סדר שהוא לחומר הנמצא מתחת לשטח־הפנים. לפיכך, לא די בתבנית של פסל כדי להסביר את התרבותם של אורגניזמים: חייבת להיות גם תבנית פנימית. וכדברי בופון,

אפשר לטעון ולומר שמונח זה, 'תבנית פנימית', כולל במבט ראשון שני רעיונות הסותרים זה את זה, שרעיון התבנית אינו יכול להתייחס אלא לשטח־הפנים, ורעיון התבנית הפנימית חייב להתייחס למסה; הרי זה כאילו רצה מישהו לצרף את רעיון שטח־הפנים ואת רעיון המסה, ואפשר לומר 'שטח־פנים מסיבי' בדיוק כמו שאפשר לומר 'תבנית פנימית'.¹⁴

בקושי מעין זה נתקלים גם כאשר בוחנים את התפתחות העובר,

שהרי גדילת האיברים מתרחשת באופן תלת־ממדי ולא באופן דו־ממדי. בניגוד לדעה הרווחת, טען בופון, התפתחות איננה מתרחשת אך ורק על־ידי הוספה של מולקולות לשטח־הפנים, אלא 'על־ידי תחיבה פנימית החודרת אל תוך המסה'.¹⁵ ואכן, החומר המשמש בגדילה חייב לחדור לתוך כל חלק ולתוך כל הממדים בהתאם ל'סדר מסוים ולמידה מסוימת, כדי שלא יגיעו עודפי חומר לגקודה פנימית אחת יותר מאשר לאחרת'.

התבנית הפנימית מייצגת איפוא מבנה חבוי, 'זיכרון' המארגן את החומר באופן שילד ייווצר בדמות הוריו. הילד נוצר באפיגנזה. אולם אין זו יצירה חדשה לגמרי, כפי שהבינוה אריסטו ואנשי המאה ה-16 – ארגון מוגמר של היצור המופיע מתוך התנהגותו של החומר – שהרי מידה מסוימת, או זכר, של הארגון שכבר קיים בהורים משתמר על־ידי רציפותה של התבנית הפנימית. 'מה שקבוע ביותר בטבע, מה שאינו משתנה בו, אמר בופון, הוא החותם או התבנית של כל מין, הן בבעלי־החיים והן בצמחים; מה שמשתנה ביותר ומה שניתן להריסה יותר מכול הוא החומר שהמין מורכב ממנו'.¹⁶ ואילו מופרטואי העלה בדעתו שקיימת קבוצה נבחרת של חלקיקים חיים המשמרים את התכונות האופייניות הטיפוסיות של המין במשך הדורות:

האם אינסטינקט זה [של החלקיקים], בדומה לרוחה של רפובליקה, מתפשט בכל החלקים היוצרים את הגוף? או שהוא, בדומה למונרכיה, שייך רק לחלק שאינו מתחלק? במקרה זה, האם אין חלק זה שאינו מתחלק המהות של בעלי־החיים, בעוד האחרים הם רק עטיפות או מעין לבושים?¹⁷

במאה ה-18, הרעיון שיצורים חיים מורכבים מיסודות עדיין היה מעבר להשגתם של תצפית וניסוי. באמצעים שעמדו לרשותו ניצל בופון עד תום את כל כשרונו וכושר ההמצאה שלו, כדי להראות שקיימות מולקולות אורגניות, את חלוקתן האוניברסלית בטבע כולו ואת יכולתן להצטרף זו לזו. אך התוצאות שלו לא שיכנעו איש. יתרה מזו, ליחידות חיות אלו צריך היה למצוא מקור שיהיה מובחן ממקור האטומים. אף־על־פי שייחס בופון את היווצרותן של היחידות החיות לשפעול של חומר על־ידי חום, דומה שסיבות

תכליתיות הן היכולות להיות ההסבר היחיד כמעט לבריאה. לדעת חסידי ההיווצרות המוקדמת היתה התיאוריה בדבר יחידות חיות תיאוריה גוספת ותו לא. התוצאה המיידית ביותר שלה היתה מתן דחיפה מחדשת לרעיון הבריאה הספונטנית. שהרי, אם מולקולות אורגניות קיימות בכל מקום וניתן לקבצן בהשפעת חום, האם לא החומר האורגני עצמו – אשר, כדברי בופון, יכול 'להיחשב לזרע אוניברסלי'¹⁸ – הוא אשר יצר את העולם הבלתי־נראה והמדהים הזה, שאפשר לראות מתחת למיקרוסקופ, את כל אותם יצורים קטנים שאף אין הצדקה לכנותם בעלי־חיים, יצורים השוחים במי גשמים, בתמציות צמחים ובנוזל הזרע של הזכר? כאן ניתן היה לערוך ניסוי, היות שגם כאן היה מעורב מנגנון פשוט. מאחר שחום ממית יצורונים, הרי די לאטום מיץ בשר בתוך כלי, לחמם אותו ולבדוק האם היצורונים עדיין מכפילים את עצמם או לא. אב־המנזר נידהם שם לב, שחום לא מנע את הכפלת הזחלים הזעירים. אב־המנזר ספאלאנצאני, שהיה קפדן יותר, לא מצא יצורונים חיים אחרי חימום מיץ הבשר. אך השפעת החום היתה תמיד שאלה שנויה־במחלוקת: האם חום פועל על חומר או על כוח. 'חומר', היינו, נוכחות של יצורונים במיץ הבשר או באוויר הכלי: הניסוי של ספאלאנצאני ביטל איפוא את האפשרות של בריאה ספונטנית, אפילו בין יצורים מיקרוסקופיים. 'כוח', היינו, תכונה של מיץ־הבשר או האוויר, 'כוח מחולל', 'פריון', 'גמישות' הנחוצה להכפלת היצורונים; במקרה זה, הניסוי לא הראה דבר. כיצד ניתן היה להוכיח שכות זה קיים? או כיצד ניתן להפריך זאת? רק במאה הבאה מוכנה היתה התבונה האנושית לדחות את האפשרות של בריאה ספונטנית.

בהציגם את התיאוריות שלהם, מופרטואי ובופון לא התכוונו כלל לעסוק במטפיסיקה. בהיותם ניוטוניאנים נאמנים, רצו לבסס את תכונות היצורים החיים על החוקים המקובלים בפיסיקה. יחידות־היסוד, החלקיקים החיים והמולקולות האורגניות הועלו על הפרק רק כדי ליישב את הפירוש המכני של עולם־החי עם הפירוש הניוטוני של היקום. בופון אמר, שיצורים, ממש כמו אובייקטים דוממים, אינם אלא צירופים של יחידות, שבאמצעותן יכול 'הטבע לגוון את יצירותיו עד אין־סוף'.¹⁹ הדבר נכון כשמדובר

בגופים חיים ממש כמו בחומרים כימיים: רק היסודות ניהנים באינדיבידואליות; לתרכובות אין אישיות, הן בנות־חלוף. מעתה הפך חקר היצורים לחיפוש אחר החוקים השולטים בצירופים של היחידות האלה. הרביה, כפי שנדרש על־ידי התורשה הדואלית הקיימת בקרב בני־הכלאים, איננה אלא המנגנון המאפשר ליחידות האלה להתאסף יחד. מכאן הלכה והופיעה גישה חדשה במהלך המחצית השנייה של המאה ה-18. מעבר לרבגוניות המבנים, התהליכים וההרגלים של היצורים, צריך לחפש אחדות של הרכב ושל תיפקודיות בכל עולם־החי. בשעה שבחן בעלי־חיים נושמים, ראה בופון 'תמיד אותו הארגון הבסיסי, אותם החושים, אותם הקרביים, אותן העצמות, אותו הבשר, אותה תנועת נוזלים, אותו המשחק, אותה הפעולה במוצקים'.²⁰ מה שנחשב בחקירתם של גופים חיים לא היו אך ורק האיברים הנגישים לתצפית, אלא גם הדרך שהם מתקשרים זה עם זה. כלומר, הארגון שלהם.

הארכיטקטורה החבויה

במהלך המאה ה-18 ארגון עדיין תואר אך ורק כצירוף של מבנים וכפסיפס של יסודות האופיינים לכל יצור. אולם בשלהי המאה רכש ארגון תפקיד ומעמד שונים. בכך שתפס בהדרגה את מקומו של מבנה נראה, ארגון שימש מסד חבוי לנתונים הגלויים של התיאור – ליצור בשלמותו ולתיפקודיות שלו.

מצד אחד, עבודתו של לבואזיה חוללה שינוי בחשיבות היחסית שהוקצתה לאיברים ולתיפקודים שלהם, אכפה את רעיון התיפקודים הגדולים, המספקים את צרכיו של האורגניזם, וגילתה שחייב להיות תיאום ביניהם. אם גשימה היא תמיד בעירה, הרי כל יצור חי, יהיו צורתו ובית־גידולו אשר יהיו, חייב להיות מסוגל להשיג תמצן לעצמו. הוא חייב להשיג דלק מחומרי מזון, להעבירו למקום הבעירה, לסלק את חומרי הפסולת ולווסת את הטמפרטורה שלו – בקיצור, לבצע במדויק סדרה שלמה של פעולות. מעתה כבר לא בחנו בנפרד את הריאות, הקיבה, הלב והכליות. יצור חי כבר לא היה התאגדות פשוטה של איברים, שכל אחד פועל באורח עצמאי;

הוא נעשה שלם, שחלקיו תלויים זה בזה הדדית, וכל אחד מבצע תפקוד מסוים לטובת הכלל.

מצד אחר, גם גישתם של חוקרי־הטבע השתנתה בהדרגה. במרוצת המאה ה-18 גלמדה האנטומיה של כל מין בנפרד. הספרות של אותה תקופה עשירה במונולוגרפיות, המתארות בפרוטרוט את המבנה, התכונות והסגולות של האריה, של הדבורה או של העטלף. אולם בשלהי המאה כבר לא הגבילו חוקרי האנטומיה את עבודתם לתיאור של כל איבר בגופו של יצור חי בנפרד. הם ניסו לקשר בין איבר לביצוע, ולהשוות את אותו איבר אצל בעלי־חיים שונים או איברים שונים אצל אותו בעלי־חיים. מעתה לא די היה בחקירת רגל של סוס בלבד. למשל, דוֹבְּטוֹן סבר, שצריך לערוך השוואה בינה לבין רגל של אדם, כדי להגדיר את האנלוגיות במספר העצמות, צורתן ותפקודיהן. קמפר סבר, שצריך להשוות את המוח ואת מערכת השמע של דגים עם אלה של האדם, כדי לקשור מבנה עם תפקוד. גם ויק ד'אזיר אמר, שצריך לערוך הקבלה בין מבנה השיניים, הקיבה, הטפרים והשרירים אצל מינים שונים של בעלי־חיים טורפים, כדי לגלות את הקשרים ביניהם ולהראות את קביעותם. הבדלים שטחיים לא קבעו עוד, אלא רק קווי־דמיון בעומק.

באופן זה החלה מתגלה רשת שלמה של יחסים חדשים בין היצורים החיים. עד אמצע המאה ה-18, התכונה האופיינית היתה רק חלק של האורגניזם, יסוד עצמאי שנבחר בגלל נוחיות המיון. אולם בעת החיפוש אחר קווי־דמיון בתפקודיות, יצאה התכונה האופיינית מבידודה והיא הפכה להיות חלק מהשלם. אולם תפקידה של התכונה האופיינית בסיווג לא נעלם: בעיני ויק ד'אזיר או סטור היא שמרה על הערך שהיה לה בעיני טורנפור וליניאוס. אולם עתה צריך היה להתייחס לתכונה האופיינית לא כשהיא לעצמה אלא כאל פונקציה של הקשרים המאחדים את מיקבץ המבנים של האורגניזם. 'הקשרים לעולם אינם שלמים', אמר לאמארק, 'כשהם עוסקים בבדיקה מבודדת, כלומר, כשהם נקבעים רק לאחר בדיקה של חלק אחד הנלקח בנפרד.'²¹ מעתה ואילך מה שקבע היו לאו דווקא התכונות האופייניות כשהן לעצמן, אלא הקשרים ביניהן. רק

הניתוח של קשרים אלה איפשר להגדיר את הרכבו של יצור חי ולקבוע מהו סיווגו. כבר לא היה די בבדיקה מדוקדקת של קווי הדמיון בקרב האורגניזמים וההבדלים ביניהם. צריך היה להשוות אותם במסות גדולות. 'השכל', אמר גתה, 'צריך ליטול את השלם, ועלידי הפשטה להסיק ממנו על הטיפוס הכללי.'²² מאחרי המערכת-המצורפת של האיברים החלה להתגלות הלוגיקה של האורגניזם.

באותה תקופה כבר לא סברו חוקרי-הטבע שלכל חלקיו של היצור החי יש חשיבות דומה עבור האורגניזם כשלם. כדי לחיות, הצמח או בעל-החיים צריכים קודם-כול להיזון ולהתרבות. כל היסודות של האורגניזם מסודרים לפי סדר החשיבות שלהם. אם לתכונות האופייניות יש ערכים שונים, אין זו תוצאה של דירוג שרירותי, שנקבע אך ורק לצורכי סיווג, אלא סדר זה משקף את החשיבות היחסית של האיברים במבנה השלם. יש סדרים שונים של תכונות אופייניות, אשר להן משקל שונה. הדבר תלוי בקביעותן באורגניזם זה או אחר. שכן, לא די למנות תכונות אופייניות, אלא צריך גם 'לשקול' אותן. למשל, תכונה אופיינית מסדר ראשון שקולה בערכה לכמה תכונות אופייניות מסדר שני, וכך הלאה. 'כשמצרפים תכונות אופייניות זו לזו', אמר אנטואן לורן דה-ז'וסיה, 'אין למנות אותן כיחידות, אלא צריך למנות כל אחת בהתאם לערכה היחסי; באופן זה, תכונה אופיינית קבועה אחת שקולה בערכה, או אפילו חשובה יותר, מכמה תכונות אופייניות בלתי-חשובות ביחד.'²³ תפקידה של התכונה האופיינית במבנה האורגניזם הוא הנותן לה משקל ומצוין את מקומה בהירארכיה. איברי ההפריה אינם חשובים רק משום שהם מביאים תועלת בסיווג. הם מביאים תועלת עובדה זו הם משקפים את מבנה הצמח כולו. 'צריך להעניק תשומת-לב מיוחדת לאיברי ההפריה', אמר לאמארק בספרו *La Flore française*,

כלומר, הפרי, הפרח וכל מה שתלוי בהם. העיקרון מבוסס קודם-כול על החשיבות הרבה שמייחסים באופן טבעי לאיברים אלה, המכילים את הערובה לדור העתידי, ואשר אליהם מתקשר, כאילו היו מרכזו, המנגנון המשני של החלקים האחרים, החיים כמדומה רק למען עצמם.²⁴

הכפיפות של תכונות אופייניות משקפת הירארכיה של מבנים.

וכך התחולל בשלהי המאה ה-18 שינוי ביחסים בין חוץ לפנים, בין שטח הפנים ובין העומק, בין איברים לתיפקודים של היצור החי. מה שנעשה זמין לניתוח השוואתי היתה מערכת של קשרים בעומק היצור החי, שעוצבה כדי שיתפקד. מעבר לצורות הנראות ניתן היה להבחין במיתאר של ארכיטקטורה סודית, שכורח החיים הכתיבה. מבנה מסדר שני זה היה ארגון, אשר איחד לשלמות לכידה אתת הן את הנראה והן את החבוי. לדעת לאמארק, 'מכל הבחינות, ארגון הוא תיוני מאוד כדי להדריך את חקר הפיזור השיטתי והטבעי של בעלי החיים'.²⁵ הוא מכונן את החקירה, שכן 'אצל בעלי החיים נקבעים הקשרים העיקריים תמיד בהתאם לארגון הפנימי'.²⁶ ארגון זה מאפשר לנו לסרוק את עולם החי ולהשליט סדר כלשהו במורכבותו, שהרי 'כל מחלקה צריכה לכלול בעלי חיים שניתן להבחין ביניהם על פי מערכת ארגונית מסוימת'.²⁷ בדרך זו ניתן היה להציג ולתאם הבדלים מבניים וקביעות תיפקודית בתוך אותו מרחב. ארגון הוא הנותן ליצורים חיים את החוק הפנימי, הקובע את עצם האפשרות של קיומם.

לכינונו של מושג הארגון בלבו של עולם החי היו כמה תוצאות. ראשית, מכאן ואילך נחשב האורגניזם כמכלול לאוסף משולב של תיפקודים, ולפיכך, של איברים. צריך היה לבחון ביצור לא כל חלק בנפרד, אלא את השלם, 'את ההרכב של כל ארגון בשלמותו, כלומר, הכלליות שלו', אמר לאמארק.²⁸ ואם גם ניתן לייחס ערך וחשיבות בלתי שווים לחלקים, הדבר נעשה תמיד ביחס לשלם. דבר זה אפשר היה לראות בבהירות רבה בצורות הארגון הפשוטות ביותר. לאמארק אמר, ש'במיוחד בין חרקים, מבחינים שהאיברים התיוניים לקיומם של חיים מפוזרים באופן אחיד כמעט, במרבית המקרים הם ממוקמים על פני כל הגוף, במקום שיהיו מבודדים במקומות מסוימים כמו אצל מרבית החיות המושלמות ביותר'.²⁹

שנית, מושג הארגון הוביל להתפתחות שגיצניה כבר התגלו במאה ה-18: הרעיון שיצור חי איננו מבנה מבודד במרחב ריק, אלא הוא משולב בטבע וקשור אליו ביחסים רבים ומגוונים. כדי שאורגניזם

יחיה, ינשום ויזין את עצמו, צריכה לשרר הרמוניה בין האיברים האחראיים לתיפקודים אלה ובין התנאים החיצוניים. האורגניזם צריך להגיב למה שלאמארוק כינה בשם 'נסיבות'; 'נסיבות', משמע, בתי-גידול על-פני האדמה או במים, קרקע, אקלים וצורות חיים אחרות המצויות בסביבתם המיידית של האורגניזמים. בקצרה, 'מיגוון סביבות שהם חיים בהן'.

לבסוף, מושג הארגון הביא לחלוקה קיצונית בין האובייקטים בעולם. עד לאותה תקופה, הגופים בטבע חולקו באופן מסורתי לשלוש ממלכות: חי, צומח ומינרל. לפי חלוקה זו, אפשר לומר שהאובייקטים הדוממים הם כביכול באותה רמה עם היצורים; לדעה זו היתה הצדקה, כי באותם ימים סברו שקיימים מעברים הדרגתיים בלתי-נראים בין מינרלים לצמחים, כמו גם בין צמחים לבעלי-חיים. בשלהי המאה ה-18 פאלאס, לאמארוק, ויק ד'אזיר, דה'ז'וס'יה וגתה סידרו מחדש את 'תוצרי הטבע' בשתי קבוצות, במקום בשלוש, על-פי קנה-המידה של ארגון בלבד. כבר ב-1778 אמר לאמארוק:

ראשית, ניתן לציין מספר גדול של גופים, המורכבים מחומר שהוא גס, מת, ואשר גדלים רק בגלל צמידותם של החומרים המרכיבים אותם ולא בגלל עקרון התפתחות פנימי כלשהו. יצורים אלה קרויים באופן כללי 'יצורים אי-אורגניים' או 'יצורים מינרליים'... ליצורים אחרים ניתנו איברים המתאימים לביצוע תיפקודים שונים והם מבורכים בעיקרון ויטלי בולט מאוד ובכושר ליצור את הדומה להם. הם נמנים עם הקבוצה הכללית המכונה 'יצורים אורגניים'.³⁰

מאז ואילך היו רק שתי מחלקות של גופים: האי-אורגני, זה שהוא לא-חי, דומם, אינרטי. האורגני, זה שנושם, ניזון ומתרבה; הוא היה כל מה שחי ו'בהכרח נידון למות'.³¹ ארגון זוהה איפוא עם החי. יצורים הופרדו באופן מוחלט מאובייקטים דוממים.

משעה שהופרדו היצורים מגופים אחרים, אבל קובצו בינם לבין עצמם לפי הארגון שלהם, הסוגיה של ראשית עולם-החי כבר לא הוצגה באותם מונחים שהוצגה הסוגיה של ראשית עולם-הדומם.

מעתה, כפי שכתב לאמארק, כבר לא היה צורך להניח שכל הצורות החיות או מרביתן נבראו בעת ובעונה אחת בכל מורכבותן; הן יכולות היו להיגזר זו מזו בסדרה של וריאציות רצופות. מאחר שלנטיה של הטבע במהלך התקדמותו היתה השפעה מצטברת גם על מבנה האורגניזמים, ניתן להעלות על הדעת שהסדרה הרציפה של אורגניזמים במרחב היא תוצאה של סדרה רציפה של טרנספורמציות בזמן. הופעת היצורים, וכן רבגוניותם, מקורה איפוא באופיין של החי עצמו: יכולתו להשתנות ולהסתגל.

בהדרגה הופיע מדע חדש, שכבר לא חקר צמחים או בעלי־חיים כמחלקות מיוחדות בקרב הגופים בטבע, אלא דווקא את היצור החי, הניחן בתכונות מיוחדות במינן בזכות ארגון מסוים. לאמארק, טן־ביראנוס ואוקן השתמשו, כמעט בעת ובעונה אחת, במונח 'ביולוגיה', כדי להגדיר מדע חדש זה. 'כל דבר שבדרך־כלל משותף לצמחים ולבעלי־חיים', אמר לאמארק,

כמו כל הקְּשָׁרִים המתאימים לכל אחד מהיצורים האלה, בלי יוצא מן הכלל, חייבים להוות את הנושא הנרחב המיוחד במינו של הביולוגיה: שכן, שני סוגי היצורים, שזה עתה התייחסתי אליהם, הם כולם, בעיקרו של דבר, גופים חיים והיצורים היחידים מעין אלה הקיימים על כדור־הארץ שלנו. השיקולים הנוגעים לביולוגיה אינם תלויים איפוא בהבדלים שניתן למצוא בטבעם של צמחים ובעלי־חיים, במצבם ובכשרים המיוחדים לכמה מהם.³²

וכן, מצויד בשם ובמושא מחקרי, פיתח המדע החדש בהדרגה, במרוצת המאה ה-19, מושגים וטכניקות משלו. מעבר להבדלים בצורה, בתכונות ובבית־גידול, היה הכרח לגלות את התכונות האופייניות המשותפות למערכות חיות ולצקת תוכן למה שכונה מאז ואילך בשם 'חיים'.

הרציונליזם של התקופה הקלאסית גרס, שידיעה מבוססת על הסכמה בין מושא לנושא, על הרמוניה בין דברים ובין ייצוגם על-ידי השכל. בשלהי המאה ה-18, עם הופעתו של מה שכינה קאנט בשם 'שדה טרנסצנדנטלי', הנושא מילא תפקיד הולך וגדל בחקר הטבע. במקום הרמוניה קבועה-מראש באה ההעדפה של הכושר-לדעת על פני המושאים-שיש-לדעתם. כדי לפענח את הטבע ולגלות את חוקיו כבר לא די היה לחפש ולסדר זהויות והבדלים בין יצורים למושאים דוממים, כדי לסדרם במערכת סיווג דרממדי. אלא צריך היה לקבץ נתונים אמפיריים בעומק ולהפגישם ברמות שונות בהתאם לקשריהם עם יסוד מאחד כלשהו, שהיה התנאי לכל ידיעה ועם זאת מעבר לידיעה. כמו בכל תחום אמפירי, כבר לא היה די בניתוח פנימי בלבד כדי להסביר את עולם-החי. חיים עצמם הם אשר שימשו נקודת-התייחסות, טרנסצנדנטל, המאפשרת להכרה לחבר את הייצוגים ולקבוע קשרים, לא רק בין יצורים שונים, אלא גם בין היסודות השונים בתוך יצור יחיד. בחקר עולם-החי, חיים הם שאיפשרו להגיע לאמיתות אפוסטריורי ולמש סינתזה.

את רעיון הארגון, אשר מכאן ואילך היה כלול בהגדרה של יצור חי, אותו עצמו לא ניתן לתפוש מבלי להניח שיש מטרה המזוהה עם חיים: מטרה שאיננה נאכפת עוד מבחוץ על-ידי כורח המייחס לגופו את יצירת היצורים, אלא מקורה בארגון עצמו. זה היה רעיון הארגון, משהו שלם שכרוכה בו בהכרח תכליתיות, עד כדי כך שלא ניתן להפריד בין מבנה לחשיבות שלו. לדברי קאנט, כשרואים צורה גיאומטרית מצוירת בחול, אפשר להיות בטוחים שחלקי הצורה לא התאספו שם במקרה.³³ נראה שהחלקים מחוברים זה לזה על-ידי קשר חיצוני, אך המבנה השלם הוא המאפשר את לכידותם, הוא המייצג סדר בסביבה של אי-סדר. מאחר שהחול נתון לחסדי מזג-האוויר, הוא נוטה להתיישר, והרישום נמחק. אפשר ליצור את הצורה ולשמר אותה רק על-ידי כוח פנימי, הפועל נגד המקריות וההרס. תוצר מאורגן של הטבע הוא מטרה ואמצעי כאחד. 'כל יצור', אמר גתה, 'מכיל בתוכו את הסיבה לקיומו; כל החלקים

פועלים זה על זה... וכך, כל בעל-חיים הוא מושלם מבחינה פיסיולוגית.³⁴ תכליתיות בעולם-החי מקורה איפוא ברעיון האורגניזם, מאחר שהחלקים צריכים ליצור זה את זה, מאחר שהם צריכים להתחבר ליצירת השלם, מאחר שיצורים חיים, כפי שציין קאנט, חייבים להיות ניחנים ב'ארגון עצמי'.³⁵ גם קאנט הביא, בצורה שונה במקצת, את הדוגמה של השעון, שפונטנל השתמש בה. בשעון, לכל חלק יש תפקיד בתנועה של החלקים האחרים, אך גלגל-שיניים לעולם איננו הסיבה הפועלת היוצרת גלגל אחר. חלק מתקיים למען חלק אחר, אך לעולם לא בגלל אחר. אין למצוא את הגורם היוצר גלגלי-שיניים בטבע גלגלי-שיניים, אלא מחוץ להם, ביצור בעל יכולת להוציא אל הפועל את רעיונותיו. שעון איננו יכול לייצר חלקים הנלקחים ממנו, להחליף חלקים פגומים בחלקים אחרים, וגם לא לתקן את תנועת השעון, כשזו איננה סדירה. יצור מאורגן איננו איפוא סתם מכונה, שהרי למכונה יש רק כוח תנועה, ואילו האורגניזם ניחן בכוח היווצרות ובקרה שהוא מעביר לחומר שממנו הוא עשוי.

בתקופה הקלאסית, כל עוד התמקדו החוקרים בהצגת אחדותו של היקום, היצורים החיים צריכים היו לציית לחוקי המכניקה השולטים באובייקטים הדוממים. הכוחות הנותנים חיים לגופים מאורגנים אופיינו במונחים ששימשו לתיאור התנועה המתקיימת באופן רציף בחלקיהם הנוזליים או המוצקים. מושג החיים לא היה קיים, כפי שמלמדת ההגדרה ב-*Grande Encyclopédie*, שהיא כמעט אמת המעידה על עצמה: חיים 'הם ההיפך ממוות'. לעומת זאת, בתחילת המאה ה-19 חשוב היה להגדיר את תכונות החי. אל חקר היצורים כבר לא התייחסו כאל הרחבה של מדע האובייקטים הדוממים. כדי לחקור את החי נדרשו שיטות ומושגים חדשים, וגם שפה מיוחדת; שכן במדע של גופים מאורגנים, מלים ביטאו רעיונות שהיו מקובלים במדעים הפיסיקליים ולא התאימו לתופעות הביולוגיות. 'אילו פיתחו בני-האדם את הפיסיולוגיה לפני הפיסיקה,' אמר בישה,

אני משוכנע שהם היו מיישמים הרבה מהראשון לאחרון; הם היו מסבירים שנהרות זורמים בגלל הפעולה הטונית על גדותיהם, גבישים מתלכדים

בגלל עירור רגישותם ההדדית, וצמחים נעים מפני שהם מעצבנים זה את זה ממרחק רב.³⁶

במאה ה-19 כבר לא היה הולם לתאר את תיפקודיות היצורים המאורגנים במונחים של משקל, זיקה ותנועה. כדי לשמור על לכידות היצור, כדי להבטיח סדר בחי בניגוד לאי־סדר השורר בחומר הדומם, צריכה היתה להיות תכונה מיוחדת, אשר קאנט כינה אותה בשם 'עיקרון פנימי של פעולה'; צריכים היו להיות חיים.

במדע הביולוגיה הצעיר, רעיון הארגון כולל הן את מה שמאפשר חיים והן את מה שנקבע על־ידי חיים. אולם, אף־על־פי שחיים הם מקור כל יצור, לא ניתן להבין חיים על־ידי ניתוח של תכונותיו ותיפקודיו. הכוח העלום הוא שהעניק לגופים המאורגנים את סגולותיהם העיקריות והוא המחזיק את המולקולות שלהם ביחד, למרות כוחות חיצוניים הנוטים להפריד ביניהן. כפי שאמר קוֹבֵיָה, זהו הכוח המעניק לגופה של אישה צעירה,

חמוקים מעוגלים ומפתים, גמישות תנועה, המימות עדינה, לחיים שצבען ורוד חושני, עיניים הנוצצות בזיק אהבה או באש תבונה, תכונות גופניות המתעוררות לחיים על־ידי בדיחות הדעת או על־ידי אש התאוה. אולם די בהרף־עין, וקסם זה יחלוף כלא היה.³⁷

הגוף החי נתון לפעולתן של השפעות שונות, שמקורן באובייקטים דוממים וביצורים גם יחד, הנוטות להרוס אותו. כדי לעמוד בפני פעולה זו, נדרש עיקרון של פעולת־נגד. חיים אינם אלא עיקרון זה של מאבק כנגד הרס. לדעת בישה, חיים הם 'מכלול התיפקודים המתנגדים למוות';³⁸ לדעת קוֹבֵיָה, זהו 'כוח המתנגד לחוקים השולטים בגופים דוממים';³⁹ לדעת גתה, זהו 'כוח בונה כנגד פעולתם של אלמנטים חיצוניים';⁴⁰ ולדעת ליביג, זהו 'כוח מניע, המנטרל את הכוחות הכימיים, את הלכידות ואת הזיקה הפועלים בין מולקולות'.⁴¹ מוות הוא תבוסתו של עקרון התנגדות זה, וגוויה איננה אלא גוף חי שנכבש בידי כוחות פיסיקליים. כוחות הסדר, האחדות והחיים נאבקים בהתמדה בכוחות האי־סדר, ההרס והמוות. הגוף החי הוא זירת המלחמה הזאת, שבה בריאות וחולי

משקפים את שינויי המזל. אם התכונות הוויטליות מנצחות, שוב שוררת הרמוניה ביצור החי והוא מחלים. ולהיפך, אם התכונות הפיסיקליות חזקות יותר, התוצאה היא מוות. ואילו בגופים הדוממים, אין רואים כלל דבר מעין זה; אובייקטים דוממים אינם בני־שינוי, כמו המוות עצמו.

אולם, אף־על־פי שבאופן מקורי הארגון, התיפקודיות וכל הארכיטקטורה של יצור נזקקו להתערבותו של עקרון החיים, נמצא לבסוף שהיצור החי אפוף בחיים מכל עבר. ובעוד התכונות הפיסיקליות של חומר הן נצחיות, התכונות החיות של יצור הן בנות־חלוף. חומר דומם הנכנס לגופים חיים סופג תכונות ויטליות. היצורים הופכים להיות 'מעין כבשנים', ציין קובינה, 'אשר לתוכם מועברים חומרים מתים בזה אחר זה, כדי ששם יצטרפו יחד... ויימלטו באחד הימים, כדי לשוב ולהיות כפופים לחוקיו של הטבע המת'.⁴² ניתן לומר שבמשך חייו של יצור, התכונות הפיסיקליות כבולות כביכול על־ידי התכונות הוויטליות; לפיכך הן מנועות מליצור את התופעות שטבען גורם להן ליצור. אולם אין זו ברית נצחית, כי מה שאופייני לתכונות ויטליות הוא שכוחן תש במהרה. 'זמן גורם להן בליה', אמר בישה.⁴³ העובדה שהאורגניזם חי, משמעה שגזר עליו למות. היצור החי לוכד את כוח החיים בדרך כלשהי; הוא מקבע כוח זה ומחזיק בו, אך רק באופן זמני, היות שהוא נהרס בדיוק על־ידי מה שגרם לחיים להופיע. 'אם חיים הם אִם המוות', אמר קאפאניס, 'אזי מוות בתורו יולד חיים ומנציח אותם'.⁴⁴ החי מצטמצם לערימת חומר, שחיים נגעו בה ברפרוף. אף־על־פי שתכונות ויטליות פְּלוֹת בכל אורגניזם, הן משתמרות בעולם־החי. כל גוף חי, בין אם נולד מזרע או שהוא עובר, היה פעם חלק מגוף דומם. לפני שהשיג אוטונומיה, לפני שיהיה בתורו למקום מושבם של חיים עצמאיים, כל יצור חילק תחילה את חייו עם יצור אחר, שממנו הוא ניתק בבוא שעתו. חיים מועברים מיצור ליצור ברצף שאין לו סוף. החיים הולכים ונמשכים עוד ועוד.

ויטליזם זה שונה לגמרי מהאנימיזם של התקופה הקלאסית. במאה ה-19 ההידרשות לעיקרון ויטלי נבעה מגישתה של הביולוגיה עצמה, מהצורך להפריד יצורים מאובייקטים דוממים ולבסס

הפרדה זו לא על חומר שאתדותו היתה מוכרת, אלא על כוחות. הוויטליזם תיפקד כגורם של הפשטה. חיים שיחקו תפקיד מדויק בידע. חיים עצמם היו מושא החקירה, הדבר שאותו חקרו בבעלי-החיים או בצמחים. חיים ייצגו אותו חלק מהבלתי-ידוע, שבגללו היה האורגניזם שונה מאובייקט דומם, והביולוגיה מובחנת מהפיסיקה. הוויטליזם היה הכרחי לכינונה של הביולוגיה, ממש כשם שהמכניזם היה הכרחי בתקופה הקלאסית לא רק לחוקרי-הטבע, לפיסיולוגים ולרופאים, אלא גם לכימאים החוקרים 'תרכובות אורגניות', אותם חומרים המרכיבים את היצורים החיים או נוצרים על-ידיהם. 'אפשר לציין, אמר ליביג, 'שבחקר האורגניזם החי לא ימצא כל יישום לדיאקציות של גופים פשוטים ולתרכובות מינרליות שהוכנו במעבדות שלנו'.⁴⁵

הכימיה של החיים

בשלהי המאה ה-18 כבר חקרו את הרכבם של גופים אורגניים שונים. בעיקר שילה וברגמן ערכו אנליזה לסדרה שלמה של חומצות אורגניות ובודדו את 'החומר המתוק של השומנים', שנודע אחר-כך כגליצ'רול. בתחילת המאה ה-19 שופרו שיטות האנליזה, במיוחד לאחר גילוי האלקטרוליזה, והגדרת תיאוריית האטום באופן ברור יותר. טווח עצום של תרכובות נכללו תחת השם 'כימיה אורגנית'; כולן הכילו פחמן ומימן, לעתים קרובות חמצן ולפעמים חנקן, גופרית או זרחן. תרכובות אלו היו מרכיבי היצורים החיים או תוצרי ההפרשות והפירוק שלהם. לבואזיה המציא שיטת סיווג ואוצר-מונחים אוניברסלי בכימיה. פרז'ליוס יצר צופן אוניברסלי: כל יסוד יוצג על-ידי האות הראשונה של שמו הלטיני, ואחריה, אם היה צורך, על-ידי אות שניה כדי למנוע בלבול. נוסחתה של כל תרכובת נקבעה על-ידי צימוד הסמלים המייצגים את היסודות המרכיבים אותה; לכל סמל ניתן מקדם מספרי, המראה את מספר האטומים במולקולה. שיטות אנליטיות משופרות והשימוש בסמלים אלה איפשרו להפעיל ולסמל את מספרן העצום של המולקולות שהכילו היצורים החיים.

אולם כדי לכונן את מדע הכימיה האורגנית, לא היה די בשיפור הטכניקות של הכימיה האי־אורגנית. היתה דרושה גם נקודת־המבט של הביולוגיה, אשר בחיפושיה אחר מה שמצוי מעבר לרבגוניות היצורים, החלה להגדיר את אחדותו של עולם־החי. כל עוד ייצג עולם זה מספר אינסופי של מבנים, אפשר היה לצפות למספר אינסופי של תרכובות. אבל אם, לעומת זאת, החי מאופיין על־ידי ארגון מסוים ותיפקודים מסוימים, אם הוא תמיד מה שניזון, גדל ומתרבה, אזי אפשר לחקור את טבען של התרכובות שעל־פיהן מבחינים בינו ובין חומר לא־חי, וגם את הריאקציות שבאמצעותן הוא מפרק חומרי מזון ומנצל אותם. בכך הוסרו הגבולות של תחום שגבל בכימיה מצד אחד, מאחר שהחומרים של היצורים נוצרים מיסודות כימיים כלליים המרכיבים כל חומר, והתקרב לביולוגיה מצד אחר, שהרי חומרים אלה היו שונים לגמרי מאלה שתקרה הכימיה האי־אורגנית.

מה שהיה נגיש באופן ישיר ביותר לאנליזה כימית היתה זרימת חומר דרך יצורים חיים – ה'מטמורפוזה' של מזון לתרכובות אופייניות, ויצירתם והפרשתם של תוצרי פסולת. משימתה של הכימיה האורגנית היתה איפוא ללמוד את הטרנספורמציות המתחוללות בחומרים הנמצאים בתוך האורגניזמים, ולזהות את טבע היסודות וצירופיהם בכניסתם וביציאתם. אולם טרנספורמציות אלה הציבו אתגר לחוקי הכימיה הרגילה: כשאוחדו בצירופים חדשים, הסתבר שהיסודות המרכיבים יצורים ניחנים בתכונות שונות לחלוטין. הכימיה האורגנית צריכה היתה לזהות את החומרים המרכיבים את החי ועוברים דרכו. היא היתה צריכה לנסות לערוך להם אנליזה. אך לא ציפו שסינתזה כימית תספק הוכחה לטרנספורמציות האלה. 'כל פעולות הכלכלה [של הגוף]', אמר ליביג, 'כפופות לפעילות לא־חומרית כלשהי, אשר בה אין הכימאי יכול להשתמש ככל העולה על רוחו.'⁴⁶ ווהלר הכין במעבדה תכשיר של שתֶנן (אוֹרָאָה) על־ידי הרתחת תמיסה של אמוניום ציאנט – אך הוא עצמו סירב לדאות בכך סינתזה של תרכובת אורגנית מגופים אי־אורגניים. שכן, אף־על־פי שחומר הגלם, חומצה הידרוציאנית, היתה תרכובת פשוטה יחסית, היא עדיין היתה חומר אורגני. 'פילוסוף של הטבע', כתב ווהלר לברזליוס, 'היה אומר

שהאופי האנימלי האורגני לא נעלם מפחמן החיה ומצירופי הציאנט האלה, ולפיכך אפשר לקבל מגופים אלה גופים אורגניים אחרים.⁴⁷

רק לאחר שהפיק ברתלו אצטילן מפחמן וממימן עתיד היה ליפול החיץ שהציבו הכימאים בין האורגני לאי־אורגני. ובכל זאת, במחצית הראשונה של המאה ה-19 גילו חוקרים, באמצעיה של האנגליזה בלבד, את נוכחותן של מספר ניכר של תרכובות שונות ביצורים חיים, שחלקן הכילו חנקן וחלקן לא. חומרים אלה מילאו תפקידים שונים באורגניזם, בהתאם להרכבם.

התברר שצירופים של אותם יסודות מציגים לפעמים תכונות שונות; הדבר תלוי אם הם מופיעים בחומרים מינרליים או בחומרים אורגניים. יצורים חיים צריכים היו איפוא להכיל כוח מיוחד, אשר גורם לשינוי צורה ותנועה בחומר, אשר מפריע והורס את מצב האי־פעילות הכימית המקיימת את צירופי היסודות הכימיים בחומרי מזון: זה היה 'כוח ויטלי'. 'הוא גורם לפירוקם של חומרי מזון', אמר ליביג,

הוא מפר את המשיכות המשפיעות כל העת על חלקיקיהם; הוא משנה את כיוון הכוחות הכימיים בחומר כדי לקבץ סביבו את היסודות הכימיים של חומרי המזון וליצור תרכובות חדשות... הוא הורס את לכידותם של חומרי מזון וגורם לכך שהתוצרים החדשים יתאחדו בצורות חדשות, המובחנות מאלו שיש להם כשכוח הלכידות פועל באין מפריע.⁴⁸

הכוחות הכימיים, המקבצים את האטומים במולקולות אי־אורגניות, פועלים בגופים חיים כהתנגדות שיש להתגבר עליה על־ידי הכוח הוויטלי. אילו היו שני הכוחות שקולים בחוזקם, לא היו מתרחשים שום תוצא, שום גדילה, שום התרבות. אילו ניצח הכוח הכימי, היתה באה כליה על האורגניזם. כדי שאורגניזם יחיה, הכוח הוויטלי חייב לנצח. אי־אפשר לייחס ויטליות לכל איבר, רקמה או מולקולה שהם. ויטליות היא תכונה של היצור כולו, אופיין של השלם, היא תוצאה, אמר ליביג, של 'איחוד מולקולות מסוימות בצורות מסוימות'.⁴⁹ היא תלויה בעצם הארגון מחדש של היצורים החיים.

אם כוח ויטלי נעשה מושג כה חשוב בתחילת המאה ה-19, הרי זה משום שמילא תפקיד שמאוחר יותר באו במקומו שני מושגים חדשים. כיום, היצורים החיים נחשבים לאתר של זרימה משולשת: של חומר, של אנרגיה ושל מידע. בימיה הראשונים יכלה הביולוגיה להבחין בזרימת החומר; אולם בהעדר שני המושגים האחרים, צריכה היתה להניח שקיים כוח מיוחד. ואמנם, עד אמצע המאה ה-19, הקשרים בין חום לעבודה עדיין היו מעורפלים מאוד. לדעת קארגו, חום קשור עם תנועת החלקיקים המרכיבים את הגופים. ברבות השנים עבודתו של קארנו אמנם נחשבה ל'תעודת-הלידה' של העיקרון השני של התרמודינמיקה, אך כמעט עשרים שנה התעלמו ממנה, עד הרגע שעקרון שוויון-הערך ומושג האנרגיה איפשרו לשלב את כל התופעות שבהן מעורב חום. בינתיים, צריך היה למצוא גורם המנטרל את כוחות הזיקה בין יסודות שבמולקולות, מחלק יסודות אלה מחדש באמצעות קשרים כימיים שונים, ומקבץ מחדש את האטומים בצירופים חדשים. נדרש כוח כלשהו אשר, יחד עם אור השמש, מפריד את החמצן שבצמחים מהיסודות שאליהם יש לו זיקה חזקה ביותר, ומשחרר אותו בצורה של גז. ליביג כתב, ש'זקוקים לכמות מסוימת של כוח ויטלי, כדי לשמר את היסודות של החומרים החנקניים לפי הסדר, הצורה וההרכב האופייניים להם, וגם כדי להתנגד לפעולתם המתמדת של החמצן האטמוספירי על היסודות האלה וגם של החמצן המופרש בעת פעילות הצמחים.⁵⁰ דברים אלה בדיוק אומרים ביוכימאים מודרנים, אלא ש'כוח ויטלי' מוחלף ב'אנרגיה'. לדידם של ברזליוס, ליביג, ווהלר, ודומא, 'ויטליות' לא ייצגה עיקרון הפועל ממרחק, כמו כבידה או מגנטיות, אלא כוח הפועל 'בתוך צבר של חומר', כאשר חומרי הריאקציה באים במגע זה עם זה. כדי להשיג זאת, ויטליות נזקקה לדרגת חום מסוימת, שהרי כל תופעות החיים נפסקות כשהאורגניזם נחשף לקור. בעירה של חמצן אטמוספירי עם חומרי מזון מסוימים היא שסיפקה את החום. החומרים היכולים להתחמצן בדרך זו ולמלא 'תפקיד נשימתי' הם בעיקר תרכובות לא־חנקניות, כמו סוכרים ושומנים.

תרכובות חנקניות, לעומת זאת, מילאו 'תפקיד פלסטי' בבניית איברים ורקמות. אולם כדי להסביר את הרכבן והתרכבותן צריך היה

להזדקק שוב לכוח ויטלי. בכל היצורים החיים והרקמות שנחקרו, נמצאו תרכובות חנקניות מורכבות מאוד אך דומות מאוד. כשנערכה אנליזה לתרכובות אלו – פיברין ואלבומין בדם או קזאין בחלב – תמיד נמצאה בהם תערובת של פחמן, מימן, חמצן וחנקן במנות קבועות מדוקדקות, בתוספת כמויות משתנות של יסודות אחרים, במיוחד גופרית וזרחן. צריך היה להודות איפוא, שכל הרקמות החיות מורכבות מאותו חומר בסיסי, היכול להתרכב עם כמויות שונות של יסודות אחרים. לפיכך, אותם צירופים מסוימים הם שנתנו לאיברים ולרקמות השונים את אופייניהם. מולדר כינה מרכיב בסיסי זה בשם 'פרוטאין' (חלבון), כדי להדגיש את אופיו הראשוני. ייצור החלבון, התרכבותו עם יסודות מסוימים, הוא הבונה את הארכיטקטורה של היצורים החיים. 'יש לקבל, כחוק שהודגם בניסוי', כתב ליביג, 'שצמחים מייצרים תרכובות חלבוניות, וכי תרכובות אלו עוצבו על-ידי כוח ויטלי, בהשפעת חמצן אטמוספירי ורכיבי המים, כדי לברוא את כל הרקמות והאיברים של כלכלת [גוף] בעלי-החיים'.⁵¹ אולם אם חומרים בעלי הרכב דומה יכולים להיות ניחנים בתכונות שונות, יש לחפש עיקרון חדש. צריך היה להודות, שבמולקולות מעין אלה, אותם אטומים יכולים לתפוס מקומות שונים, וכי מיקום האטומים הוא הקובע את טבען ותכונותיהן של המולקולות. אנליזה שנערכה בשורה של תרכובות פשוטות יותר הובילה לאותו רעיון. באנליזה נמצא, כי בזוגות של תרכובות, השונות מאוד זו מזו בתכונותיהן – ציאנטים ופולמינטים או חומצות רצמיות וחומצות טרטרויות – נמצאו בדיוק אותם יסודות. גם כאן התסבר צריך היה להיות טמון במיקום האטומים במולקולה. 'איזומריזם' היה השם שנתן ברזליוס להבדל זה במבנה, הבא יחד עם זהות בהרכב. קיים איפוא עיקרון של סדר במבנה המולקולרי, שלפיו טבעה ותכונותיה של מולקולה תלויים במיקומם היחסי של האטומים שלה. בביולוגיה המודרנית, סדר מולקולרי זה, בחירה זו בין מבנים אפשריים, מוסברת בעזרת המושגים אנטרופיה ומידע. בתחילת המאה ה-19 הכימיה האורגנית עדיין נזקקה לכוח מיסתורי, המקצה לאטומים את מקומותיהם.

באשר למנגנוני הריאקציות המתחוללות ביצורים חיים, מובן שהם היו שונים מאלה שהכימאי מייצר במעבדתו. נשימה היא כמובן

בעירה, כפי שהראה לבואזיה, אך זוהי בעירה מסוג מיוחד מאוד. באורגניזמים, חומרי מזון נצרכים באיטיות רבה בטמפרטורה נמוכה, ולא במהירות ובטמפרטורה גבוהה כמו בתנור. במעבדה אפשר לפתח סוכר, אך לא להתמירו לכוהל אתילי ולפחמן דו-חמצני, כפי שנעשה הדבר על-ידי שמרי אפיה, או לחומצה בוטירית ומימן, כפי שנעשה הדבר על-ידי ריאקציה בגבינה. באורגניזמים קיימים איפוא עקרונות מסוימים – או חומרים – המכונים 'תססים' או 'מפרקים', המכוונים את מהלכן של הריאקציות הכימיות כדי לשנות את הקשרים בין היסודות, וכך לשנות חומר לתוצרים חדשים. יש שתי דרכים לבחון תססים אלה. ראשית, אפשר לטעון, כמו ליביג, שחומרים מסוימים מסוגלים להעביר חלק מתכונותיהם לחומרים אחרים. במקרה זה, תססים הם חומרים אשר האטומים שלהם נמצאים במצב של עירור גבוה, ואשר משנים תרכובות אחרות על-ידי העברת התנועה שלהם אליהן.

את תופעות הפירוק ניתן להסביר רק אם מקבלים שהן תוצאה של מגע עם גוף, שהוא עצמו נמצא במצב של פירוק או בעירה... לתנועת המולקולות של אחד מהגופים המגיבים חייבת להיות השפעה מסוימת על שיווי-המשקל של המולקולות של החומר שהוא בא במגע אתו.⁵²

שמרי שיכר מתססים סוכר, מאחר שהם מכילים חומר במצב של 'מטמורפוזה'. בגלל הסגולה הכימית, המיוחדת לתססים, הפירוק מתפשט אל מעבר לסביבתו של אותו חומר ומשפיע על המולקולות של תרכובת סמוכה.

אולם אפשר לייחס, כמו שעשה ברזליוס, את תכונות התססים לכוח כימי חדש, המתגלה בעת הטרונספורמציה של תרכובות מסוימות, מינרליות ואורגניות כאחד. התברר שבמצב מוצק או בתמיסה, גופים רבים, פשוטים או מורכבים, מסוגלים לפעול נגד הכוחות הכימיים המחזיקים יחד תרכובות אחרות ולגרום לטרנספורמציה שלהן. חומרים אלה פועלים בדרך מיוחדת מאוד. הם משנים את הקשרים הקיימים בין האטומים של חומר אחד, מבלי שהם עצמם ממלאים תפקיד כימי בריאקציה, שכן בסוף הריאקציה מוצאים אותם בשלמותם. בדרך זו גורמים מנגן, כסף או פיברין של הדם

לפירוקה של על־תחמוצת מימנית; חומצה גופרתנית, כמו הדיאסטז מזרעים גובטים, הופכת עמילן לסוכר; ולבסוף, פלטינה פעילה בטמפרטורה רגילה יכולה להצית כוהל נקי או לחמץ כוהל מהול לחומצת תומץ. ברזליוס נתן את השם 'קטליזה' (זירוז) לטיפוס זה של ריאקציה שמקורה איננו ידוע והיא מתבצעת בנוכחות גופים מסוימים.

הכוח הקטליטי מתקיים בגלל העובדה שגופים מסוימים יכולים, אך ורק בגלל נוכחותם... לעורר זיקות כימיות אשר אחרת היו נשארות בלתי־פעילות בטמפרטורה הנתונה... משמע, הוא פועל כמו חום.⁵³

את הריאקציות המתרחשות ביצורים חיים ניתן איפוא להשוות לריאקציות קטליטיות. דיאסטז, למשל, איננו מצוי בכל חלקיו של תפוח־אדמה אלא רק ב'עיניים', במקום שהעמילן מתפרק לדֶקְסֶטְרין ולסוכר. בגלל הריאקציה הקטליטית, החלק סביב כל עין נעשה מרכז לייצור מיצים, המספקים מזון לשורשים הצעירים. 'יתכן', אמר ברזליוס, 'שבצמח או בבעל־החיים מתחוללים אלפי תהליכים קטליטיים, שבעזרתם חומר־הגלם האחד של מיץ צמחים או דם יוצר כמה תרכובות כימיות שונות...'

וכך, בעזרת רעיונות ושיטות הלקוחים מכימיה, קם מדע אמפירי, כדי לחקור את הרכבם של היצורים החיים, ובהדרגה ניסח מושגים ואוצר־מלים משלו. אט־אט הוגדר טבען של התרכובות המופלאות, שרק אורגניזמים, כך נדמה היה, יכולים לייצר. ושוב, מעבר למורכבות של הארכיטקטורות המולקולריות, החלה להתגלות פשטותה של מערכת־מצורפת. כך היה, למשל, עם שומנים ושמונים, שמאז ומעולם היו מושא מחקר מועדף בעיני הכימאים. מימי האלכימיה ועד המאה ה-18, שומן חזיר, חֶלֶב כליות וחמאה נכתשו, נלושו ונשרפו מבלי שהצליחו להגדיר את טבעם או את הרכבם. שָׁבֶרֶל, שנקט שיטות אנליזה גסות פחות, מצא ששומנים נוצרים על־ידי סידור של כמה תרכובות פשוטות יותר. כשם שנת־כים נוצרים על־ידי התכת מתכות מסוימות ביחסים מסוימים, גם שומנים נוצרים על־ידי ההתרכבות של 'חומר מתוק' – מה שיוכר בעתיד כגליצרול – עם תומצות מסוימות הקרויות 'שומניות'. קיים

מיגוון גדול של חומצות שומניות אלה. טיפוס החומצה המתרכבת עם הגליצרול הוא הקובע את טבעם ותכונותיהם של שומנים ושמינים.

בריאקציות שמעורבות בהן תרכובות אורגניות, קורה שיסוד אחד תופס את מקומו של יסוד אחר, מנתקו במידה מסוימת מבלי להרוס את הארכיטקטורה של המולקולה. 'החלפות' אלו עשויות להשפיע לא רק על יסודות מבודדים, אלא גם על קבוצות של אטומים, 'רדיקלים' הנשארים קשורים יחד במהלך הטרנספורמציות הכימיות. אפשר גם להוסיף רדיקלים כחידה אחת למולקולה, לנתק אותם שוב ממנה, ולקבל אטומים נוספים מבלי שהרדיקלים עצמם ישתנו. בעבודותיהם של דומא, לז'רן, גרהארד, ווהלר וליביג הופיעו משפחות של תרכובות, 'טיפוסים' או 'גרעינים', שאליהם אפשר היה להצמיד כל מיני רדיקלים, כדי לתת למולקולה תיפקודים כימיים מסוימים: כוהל, אלדהיד, חומצה, אמין, אתר וכו'. במסה של התרכובות האורגניות נקבע סיווג בעל רישום כפול. מצד אחד, סדרות הומולוגיות שאיפשרו לסווג חומרים במשפחות טבע בהתאם להרכבן; מצד אחר, תיפקודים כימיים שכווננו יחסים בין תרכובות ממשפחות שונות בעלות תכונות דומות.

לבסוף, ניתן היה לצמצם את הרבגוניות העצומה של התרכובות האורגניות למערכת מצורפת, אשר בה מספר מוגבל של טיפוסים ותיפקודים. מגוון המולקולות ותכונותיהן נגרם על-ידי תנועתם של אטומים מסוימים או של קבוצות אטומים היכולים להיכנס למולקולה ולצאת ממנה מבלי שיחול שינוי בארכיטקטורה כולה; משהו בדומה לשלד של בניין שאפשר להחליף בו אבנים או אריחים מבלי להשפיע על המבנה הבסיסי שלו. מעבר לרבגוניות של צורות חיות, של איברים ושל תרכובות, החלה להופיע פעולתן של ריאקציות כימיות, התוקפות חומרי מזון ומסדרות אותם מחדש, כדי לייצר את טיפוס המולקולות הדרושות לחיים וכדי להפריש את חומרי הפסולת. המדע החדש, שניצב במקום הצטלבותן של הביולוגיה והכימיה, שאף להגדיר את הגבולות המדויקים של החיים, אשר בתחילת המאה ה-19 נטען שהם יחודיים ובלתי ניתנים לצמצום. הכימיה האורגנית מדדה את המרחק בין אובייקטים

דוממים ליצורים, בין מה שמציית לחוקי הפיסיקה ובין מה שאיננו מציית להם. ובדיוק מרחק זה הוא שיצטמצם בסוף המאה בזכות שתי דרכים חדשות להבנת סדר בחומר: הסדר שהמכניקה הסטטיסטית עתידה לגזור מתוך האי-סדר של המולקולות; והסדר שתשליט הכימיה הפיסיקלית במבנה המולקולות.

תוכנית הארגון

בתחילת המאה ה-19 ניסו חוקרי הטבע לגלות את הסדר השולט לא רק בין היצורים החיים, אלא גם באורגניזם עצמו. בעלי-חיים, ולא דווקא צמחים, נעשו מושאי המחקר העיקריים. מורכבות המבנה אמנם גלויה יותר לעין בצמחים, אך הצורך בארגון ברור יותר בבעלי-חיים. מעבר לארכיטקטורה המורכבת של בעלי-חיים, ניתן להבחין במיסתורין של תיפקודיו. כל דבר המצוי שם מצטרף ליצירת הרטט הבלתי-פוסק, האופייני לחיים. התנהגותם של בעלי-חיים, המעבר מבריאות לתולי אצלם, הסכנות האורבות להם בכל מקום, כל אלה מעידים על המאבק המתמיד בין כוחות החיים לכוחות המוות.

כדי לחקור את ארגונו של בעלי-חיים, לא די לחתוך אותו, כדי להבחין בכל חלקיו ולמפות אותם. אלא יש לבחון את איבריו בהתאם לתפקיד שהם ממלאים באורגניזם השלם. אולם השיטות שנקטה הכימיה עדיין היו אסורות בפיסילוגיה. הפרדת חלקים מהגוף, כדי לחקור אותם, פירושה הַדְנָטורציה שלו, שכן, כפי שכתב קובינה, 'אין אנו יכולים לפרק את המכונות, נושא מחקריו, מבלי להרוס אותן'.⁵⁴ פרטים צורניים מחוירים בהשוואה ליצור החי כולו. סידור החלקים האנטומיים משקף קשר פנימי, תיאום של תיפקודים הקושרים את המבנים בעומק. בעוד שתיפקוד הוא צורך בסיסי של החיים, האיבר הוא רק אמצעי הביצוע. אף-על-פי שתיפקוד איננו מוכן לשאת שום פנטזיות, לאיבר נתונה דרגת-חופש מסוימת. אם סוקרים את כל ממלכת-החי אפשר לראות מה קבוע ומה משתנה, וכך אפשר לקבוע מהי מידת הווריאציות באיבר, שהתיפקוד מוכן לשאת. לכן, אמר קובינה, גופים חיים הם

'סוגים של ניסויים שערך הטבע, המוסיף או מחסיר חלקים מכל אחד, כפי שהיינו אנו רוצים לעשות במעבדות שלנו, והוא מראה לנו את התוצאה של הוספות או החסרות אלה'.⁵⁵ מעבר לרבגוניות הצורות, צריך לגלות את שותפות התיפקודים. ההבדל בין מבנה של רגל ובין מבנה של כנף חשוב פחות מהדמיות בתפקידיהם. הריאה והזים אמנם שונים זה מזה לגמרי בארכיטקטורה שלהם; ובכל זאת, שניהם איברים שנועדו לנשום באוויר או במים. הבדלים צורניים בין אשך לשחלה, בין אפידידימיס לצינור פלופיאני, בין פגיס לקליטוריס – אינם צריכים להסתיר את הסימטריה של שתי הסדרות, הדמיות בתפקידים ובקשרים האנטומיים. אין זה משנה באיזה אורגניזם מדובר, תופעות החיים יכולות להופיע רק בתוך מחסה של מעטפת, המגינה עליו מגורמים חיצוניים. 'אין זה משנה אם המעטפת היא עור, קליפה או קונכיה', אמר גתה, 'כל דבר חי, כל דבר הפועל כמי שניחן בחיים, מצויד במעטפת'.⁵⁶

קווי־הדמיון האלה, שמעתה היו מבוססים על קריטריון של מקום ותיפקוד ולא עוד על קריטריון של צורה, העניקו חיים חדשים למושג האריסטוטלי הישן – אנלוגיה. חוקרי־הטבע הודו, שבמינים שונים, צורתם של מבנים עשויה להיות שונה, בהתאם לתפקיד שמבנים אלה ממלאים. לפי ז'ופרואה סנט־הילר, אפשר

לעקוב אחר הגף הקדמית על־פי שימושיה השונים ממש כמו אחר השינויים הרבים שחלו בה, ולראות כיצד משתמשים בה בהצלחה בתעופה, שחיה, קפיצה, ריצה, וכו'; כאן היא כלי חפירה, שם אנקול טיפוס, במקום אחר כלי־נשק התקפי או הגנתי; היא אפילו יכולה, כמו אצל האדם, להיות לאיבר המגע העיקרי, ומשום כך אחד הכלים היעילים ביותר של כשריגו האינטלקטואליים.⁵⁷

לדידם של ז'ופרואה סנט־הילר וקובֶיה, למלה 'אנלוגיה' יש למעשה שני היבטים שונים, שמאוחר יותר כינה אותם אוֹן 'הומולוגיה' ו'אנלוגיה'. הומולוגיה מתארת את ההקבלה בין מבנים, אנלוגיה את ההקבלה בין תיפקודים. איברים הומולוגיים נמצאים באותו מקום וממלאים תפקיד מקביל במינים שונים: למשל, יד של אדם וכנף של ציפור. לאיברים אנלוגיים אותם תיפקודים במינים שונים, למרות

הבדלים אנטומיים במבנה האיברים, מקומם ביצור ובקשרים ביניהם: למשל, קרביים במערכת העיכול, או כבד המצוי בצורות שונות בסרטנים, ברכיכות ובחולייתנים. השוואה של בעלי-חיים מאותה מחלקה מראה, שקיימים קשרים מסוימים בין מבנה האיברים המקבילים, מקומם ותיפקודם, למרות הבדלים רבים לאין ספור בגודל, בצורה ובצבע. וריאציות בצורה אינן פוזרות באקראי. כל רכיב קשור לאחרים כדי להבטיח את ההרמוניה של השלם. 'התלות ההדדית של התיפקודים', אמר קופֶּיֶה, 'ועזרתם ההדדית הן המהוות את בסיסם של החוקים, הקובעים את הקשרים בין איבריהם; חוקים שהם הכרחיים לא פחות מחוקים מטפיסיים ומתמטיים'.⁵⁸ מושא האנליזה הוא לא עוד מיקבץ מקרי של מבנים, שמספר צירופיהם הוא אינסופי, אלא מערכת של יחסים המשולבים זה בזה בחלקו הפנימי ביותר של האורגניזם. כדי לגתח ולסווג יצורים חיים, צירופים אלה אמנם חייבים להיות מסודרים סביב התיפקודים החשובים ביותר, כמו מחזורי-הדם, הנשימה, העיכול, וכן הלאה. המטרה האמיתית של הזואולוגיה הפכה להיות חקר הדרכים השונות לביצוע תיפקודים אלה; הכלי העיקרי שלה היה אנטומיה משווה.

במאה ה-19 היו שתי גישות באנטומיה משווה. הראשונה היתה כרוכה כמעט אך ורק בחקר המורפולוגיה. התייחסות לפיסיולוגיה נעשתה על-ידי הגבלת הניתוח למיקטעים תיפקודיים גדולים, שכונו בשם 'אזורים' על-ידי ז'ופרואה סנט-הילר. מכאן, שבסדרות שלמות של מינים צריך לחפש אחר מבנים מקבילים, או 'אנלוגיות', איזור אחר איזור. למשל, צריך להשוות את מכסי הזים אצל דגים לעצמימי השמע באוזן אצל חולייתנים נושמי-אוויר; או להשוות חלקים של בית הבליעה, הקנה ושלחופיות הריאה אצל בעלי-חיים יבשתיים לקשתות, לשיניים, וללוחיות הסחוס של הזימים אצל בעלי-חיים ימיים; או שוב, להשוות את ההרכב, הצורה, המקום והקשרים האנטומיים של העצם ההיואידית אצל דגים, עופות ויונקים. ואז משתמשים, כבנקודת-התייחסות, במין אשר אצלו האיזור הנידון מפותח יותר מאשר אצל שאר המינים, ולאחר מכן מנסים לסדר טיפוסים מורפולוגיים אחרים בסדרות המבוססות על הזחת האיברים והדפורמציות המתגלות בהם. לעתים קרובות

מאוד, איבר יחיד במינים שונים מראה סדרה של מעברים הדרגתיים בין שני קצוות קיצוניים. בסופו של דבר, למרות השינויים שחלו בהם, מתגלים אותם יסודות־מבנה ואותו מספר יסודות. ואז ההומולוגיה געשית ברורה ונהירה.

אולם לפעמים אי־אפשר להרכיב סדרה, אם מפני שצורות המעבר עדיין אינן ידועות, או מפני שנעלמו. במקרה זה, כדי לזהות חלק ולהכיר אנלוגיות, אין ברירה אלא לחפש 'חיבורים'. שכן, האופיין הקבוע ביותר של איזור מצוי בקשרים בין חלקיו. יהיו אשר יהיו השינויים שחלו בחלק אנטומי – שינויים בצורה, בנפח או במיקום – תמיד הוא שומר על אותם יחסים עם האיזור הסובב אותו ונשאר קשור לאותם רכיבי הסביבה המיידית. ז'ופרואה סנט־הילר אמר, ש'איבר משתנה, מתנוון או כלה ולא דווקא מחליף מקום.⁵⁹ עקרון החיבורים מאפשר איפוא לזהות חלק המופיע במין אחר. בדרך־כלל זוהי התפתחות חריגה של צורה, הקיימת גם במקום אחר. בתוך איזור נתון, המבנים השונים אינם עצמאיים. יש 'איזון איברים', כך שהתפתחות יתרה של רכיב אחד משפיעה על הרכיבים השכנים. רכיב נורמלי לעולם לא ירכוש תכונה חדשה מבלי שתהיה לכך השפעה על חלק קרוב או על רכיב אחר של המערכת. 'אם איבר כלשהו גדל במידה עצומה', אמר ז'ופרואה סנט־הילר, 'השפעתו געשית מורגשת בחלקים השכנים, החדלים מכאן ואילך להתפתח באופן רגיל; למרות זאת משתמרים כל החלקים הללו.⁶⁰ כשבדקים את עצמות הכתף של חולייתנים מבחינת תפקידם בגשימה, מוצאים וריאציות בצורה, בגודל ובמיקום, המאפשרות להבחין בארבע דרגות התפתחות: שני הקצוות הם התפתחות מוגזמת ומצב מנוון. בדגים, עצמות הכתף עוברות מעל הלב ומאחורי הזימים, כדי לפעול כעצם החזה. מבנה מסוים יכול איפוא להשתלב עם האיברים השכנים, תוך כדי שמירת תיפקודו או רכישת תיפקוד אחר. 'הסכום הכללי בתקציבו של הטבע הוא קבוע', אמר גתה. 'אולם הטבע חופשי להקצות חלקים ממנו לכל מטרה שהוא בוחר בה. אם הוא מבזבז בדרך אחת, הוא חייב לחסוך באחרת, ולכן לעולם אין הוא חייב או פושט־רגל.⁶¹

לבסוף, אם גם החיפוש אחר חיבורים איננו מתיר להכיר

בהומולוגיות, אין ברירה אלא לבחון את מערך האזורים השונים בעובר. תופעות אנטומיות מסוימות מופיעות לעתים בעת ההתפתחות העוברית ובמרוצת הזמן נעלמות בבוגר. לפי גישה זו ניתן לזהות את חלקי העצם היוצרים את הגולגולת של חולייתנים שונים. אצל בוגרים, גולגולת הדג עשויה כמדומה ממספר חלקים רב יותר מאשר אצל יונקים. אולם הבדל זה אינו קיים כאשר בוחנים את הגולגולות העובריות, ומוגים את מספר העצמות בהשוואה למספר מרכזי ההתגרמות. ואז רואים, אמר ז'ופרואה סנט־הילר, 'שבגולגולת של כל בעלי־החיים החולייתנים יש בערך אותו מספר של חלקים, וחלקים אלה מסודרים תמיד באותו אופן, אותו חיבור, והם משמשים לאותה מטרה'.⁶²

האנטומיה המשווה גם עשויה היתה לגלות קשר הדוק יותר בין הפיסיולוגיה למורפולוגיה, כלומר, בחינת האורגניזמים בשלמותם, ולא איזור אחר איזור. ההשוואה הנערכת בין הווריאציות במבנים נעשית רק כדי לגלות את התמד התיפקודים. קוביה ציין, שאנטומיה הופכת להיות לכלי־עזר שנועד למציאת 'החוקים של ארגון בעלי־החיים והשינויים החלים בארגון זה במינים השונים'.⁶³ עצם קיומו של יצור איננו תלוי רק בביצועם של תיפקודים מסוימים, אלא בתיאום ביניהם. אם כן, הגוף החי איננו אסופה סתמית של איברים, שצורפו זה לזה בדרכים שונות לביצוע תיפקודים אלה. האיברים גם חייבים להיות מצורפים זה לזה באופן שייווצר שלם הרמוני, 'מאתר שבמצב החיים', אמר קוביה, 'איברים אינם קרובים זה לזה סתם בעלמא, אלא פועלים זה על זה וכולם משתפים פעולה למען מטרה משותפת... אין תיפקוד שאיננו זקוק לעזרה ולשיתוף־פעולה של כל שאר האיברים כמעט'.⁶⁴ לפיכך, כל שינוי במבנה אחד משפיע על שאר המבנים. וריאציות מסוימות הן אקסקלוסיביות, כלומר דוחות זו את זו הדדית. לעומת זאת, אחרות נמשכות זו אל זו, כביכול, לא רק בין איברים סמוכים, אלא גם בין אלה שבמבט ראשון נראים רחוקים ביותר ולכן עצמאיים ביותר. משותפות התיפקודים ניתן להקיש את 'חוק הדו־קיום', הקובע את היחסים בין איברים.

בעל־חיים המעכל בשר בלבד חייב להיות מסוגל לראות את טרפו, לעקוב

איברי התנועה, של פיזור החומר העצבי, ושל היקף מערכת הנשימה.

במאה ה-19, עצם קיומו של יצור היה תלוי בהרמוניה שבין איבריו, הרמוניה שהיא תוצאת פעולות־הגומלין של תיפקודיו. דרך תשיבה זו שינתה בהכרח את תחומי האפשר בקרב היצורים החיים. לדעת חוקרי המאה ה-18, כל הצורות השונות הנצפות יכולות להצטרף זו לזו וליצור מיגוון עצום של גופים חיים, ככל שהדמיון מעלה על הדעת וללא שום הגבלה. ואילו במאה ה-19 היה להשקפה זו רק ערך מופשט. מעתה נטען שלא כל הווריאציות מותרות, אלא יכולים להתממש רק אותם צירופים העומדים בדרישות התיפקודיות של החיים. מבנה האורגניזם צריך להתאים לתוכנית ארגון מקפת־כול, המתאמת את הפעילויות התיפקודיות. אולם, אף־על־פי שמימצאיה של האנטומיה המשווה הראו במפורש שקיימת תוכנית כזאת, היתה לה משמעות שונה בעיני ז'ופרואה סנט־הילר ובעיני קוביה. לפי סנט־הילר, אין שום מבנים אנטומיים המיוחדים למין מסוים. אין שום חלק המופיע כאן, ונעלם שם. מה שקיים אצל אחד, קיים גם אצל האחר, אם כי השינויים עשויים להיות כה גדולים, עד שקביעת האנלוגיות לגביהם תהיה קשה. ניתן לראות זאת, למשל, כאשר חלק באיזור מסוים מקבל חשיבות כה גדולה, עד שהוא משפיע על החלקים הסמוכים. התוצאה היא שהאחרונים אינם מוסיפים להתפתח כרגיל. אך בכל זאת כולם משתמרים. בדרך־כלל ניתן להבחין בכלום, גם אם הם מצטמצמים לביטויים הפשוט ביותר ונעשים 'שאריות' חסרות־תועלת. לדעת ז'ופרואה סנט־הילר,

הטבע משתמש כל העת באותם חומרים, וכושר ההמצאה שלו מתבטא רק בגיוון הצורות. הרי זה, למעשה, כאילו הוגבל הטבע להשתמש בנתונים ראשוניים, והוא מנסה ללא הרף לברוא את אותו מספר של אותם יסודות, באותן נסיבות ועל־פי אותם קשרים.⁶⁹

כאילו מבנה בעלי־החיים פועל לפי תוכנית אחת ויחידה; לא אחת לחולייתנים בלבד, אחרת לרכיכות בלבד ועוד אחת לחורקים, אלא לפי 'תוכנית כללית' בכל האורגניזמים בממלכת־החי. חולייתנים וחסרי־חוליות, למשל, מובחנים זה מזה על־פי השוני בצורתם ולא

עצם קיומו של היצור חי. אנטואן לורן דה-ז'וסיה כבר הראה את כפיפותן של התכונות האופייניות, אבל זה היה מבוסס עדיין על אמת-מידה מבנית: אם התברר שתכונות אופייניות מסוימות שכיחות יותר מן האחרות, משמע שהן חשובות יותר. לדעת קוביה, חשיבותה של התכונה האופיינית רק מעידה על מידת חשיבותה הטיפקודית, כפיפות מבנית מתייחסת להירארכיה הטיפקודית, מערכת מתואמת המפקחת על פיזור האיברים. ניתן להעריך את חשיבותו היחסית של איבר על-פי האילוצים שהוא מטיל על האיברים האחרים. תכונות מבנה מסוימות מוציאות מכלל אפשרות תכונות מבנה אחרות או, להיפך, זקוקות להן. ניתן אפוא 'לחשב' את הקשרים בין איברים מובחנים. 'החלקים, התכונות או תכונות המבנה', אמר קוביה, 'אשר להם המספר הרב ביותר של יחסי אי-התאמה או יחסי דו-קיום – כלומר, אשר להם ההשפעה הרבה ביותר על היצור כולו – הן התכונות האופייניות החשובות או השליטות. השאר הן תכונות אופייניות נשלטות.'⁶⁸ לפנינו אפוא אמצעי להכרת התכונות האופייניות החשובות: בסדרת היצורים, הן הקבועות ביותר. אם משווים אורגניזמים זה לזה בהתאם לקווי-הדמיות ביניהם, התכונות האופייניות החשובות הן אלו המשתנות פחות מכול. דבר זה תקף באותה מידה לגבי 'טיפקודים אנימליים', כמו רגישות ותנועה רצונית, שרק בעלי-חיים ניחנים בהן, ולגבי 'טיפקודים וגטטיביים', כמו תזונה וגנרציה, המשותפים לבעלי-חיים ולצמחים. הלב ומרכיבי מחזור-הדם הם מרכז הטיפקודים הווגטטיביים, בדיוק כשם שהמוח והגזע של מערכת העצבים הם מרכז הטיפקודים האנימליים. סקר של כל בעלי-החיים מראה, ששתי המערכות האלה הולכות ופוחתות בהדרגה עד ששתיהן געלמות. 'כך בבעלי-החיים הירודים ביותר, שאצלם אין רואים כלל עצבים, אין מבחינים בסיבים כלשהם, ואיברי העיכול פשוט נפערים מתוך המסה ההומוגנית של הגוף. וכך אצל חרקים, שאצלם מערכת הצינורות געלמת אף לפני מערכת העצבים.'⁶⁸ לפיכך לא היה אפשר עוד לבסס את סיווג היצורים רק על אמות-מידה מבניות. שכן לפי אמות-מידה אלה, ארגון הטיפקודים געשה על-פי מחלקות, וכך קובצו יחד אורגניזמים מסוימים ואחרים הופרדו זה מזה. מעתה, החלוקות בממלכת-החי צריכות היו להתבסס על הזיקה בין הצורות, שהיא תוצאה של אופן סידורם של

כך נוצרת רשת שלמה של פעולות-גומלין בין מה שחי ובין מה שמאפשר לו לחיות. מבין כל האפשרויות, החי חייב להישאר בתוך הגבולות שתנאי הקיום מכתביבים לו.

ומצד אחר, מצוי הארגון של הגוף. מעתה כבר אין הרציפות מצויה בצורות ובמבנים, אלא בתיפקודים, ואלה חייבים להיות מתואמים כדי להתאים לתנאי הקיום. בתיווכם של התיפקודים מופצות אנלוגיות בכל עולם-החי. כל התיפקודים המצויים יחד במינים העילאיים נעלמים בזה אחר זה בצורות פשוטות יותר ויותר שנבדקו. כל עוד נשמרת ההרמוניה של השלם, אין מניעה שיחולו שינויים ב'סוכנים' המוציאים לפועל – כלומר, האיברים – והם חופשיים לעשות זאת. להלכה, כל איבר יכול איפוא להשתנות עד אין-סוף, וכל וריאציה יכולה להתחבר עם כל הווריאציות של האיברים האחרים ליצירת שלם רציף. אך, למעשה, דבר זה איננו קורה כלל, שהרי אין האיברים יסודות עצמאיים. הם פועלים זה על זה. כאשר בוחנים כל איבר בנפרד, אפשר לעקוב אחר התנוונותו ההדרגתית בכל עולם-החי. עדיין ניתן לזהותו בצורתו המנוונת בקרב מינים שבהם כבר לא נעשה בו כל שימוש, כאילו לא רצה הטבע להעלימו כליל. אולם לא כל האיברים מתנוונים באותו סדר בקרב בעלי-החיים. 'שהרי, אילו רצה משהו לסווג את המינים על-פי כל איבר בנפרד, מספר הסדרות שהיה מוצא היה רב כמספר איברי הבקרה.⁷²

בסיכומו של דבר, סקר של ממלכת-החי איננו מגלה סדרה ליניארית, המתקדמת מקצה אחד של ממלכה זו ועד קצה האחר בשורה של מצביי-ביניים, אלא הוא מגלה מסות לא-רציפות, המנותקות לגמרי זו מזו. אם כי מוצאים תמיד אותם תיפקודים, הם שייכים להירארכיות שונות ומבוצעים על-ידי ארגונים שונים. אין איפוא, לדעת קוביה, תוכנית אחת ויחידה לכל עולם-החי, אלא יש תוכניות רבות.

קיימות ארבע צורות עיקריות, ארבע תוכניות עיקריות, כביכול, שלפיהן עוצבו כנראה כל בעלי-החיים. החלוקות המאוחרות שלהם הן רק שינויים קלים ביותר, המבוססים על התפתחות או הוספה של כמה חלקים, אשר אינם משנים דבר מהותי בתוכנית.⁷³

על־פי השוני ביסודות המרכיבים אותם, המוסיפים לשמר את סידורם וקשריהם זה עם זה. לדעת ז'ופרואה סנט־הילר, ניתן לומר, ש'לכל חלק בחרק נמצא מקום דומה בבעלי־החיים החולייתניים, שהוא נמצא תמיד באותו מקום, ושם הוא נאמן תמיד לאחד מתיפקודיו, לכל הפחות'.⁷⁰ חרקים חיים בתוך שלדם כשם שרכיכות חיות בתוך קונכייתיהם.

לא היתה זו הפעם הראשונה שעלה הרעיון בדבר תוכנית־בניה המתאימה לכל היצורים החיים. כבר במחצית השניה של המאה ה-18 הועלה רעיון זה לעתים קרובות. בופן מצא תמיד 'אותו ארגון בסיסי' בכל עולם־החי. דובנטון ראה בו 'עיצוב ראשוני וכללי'. לדעת ויק ד'אזיר, דומה שהטבע 'פועל תמיד על־פי מודל ראשוני כללי, שממנו הוא סוטה באי־דיון'. ואילו גתה אמר, שקיימת 'צורה מהותית שהטבע איננו פוסק מלהשתעשע בה'. מה שעמד ביסוד הרעיון בדבר תוכנית אחת ויחידה, המפקחת על הרכבם של כל האורגניזמים, היה עדיין, עד לזמנו של ז'ופרואה סנט־הילר, הרעיון הישן־נושן בדבר הרציפות של עולם־החי, הרעיון בדבר שרשרת היצורים, שהיה מקובל במאה ה-18. גם עכשיו עדיין צריך היה להתייחס לרציפות, אך לא זו הנראית בכל הצורות, אלא זו החבויה במעמקי החי, כדי לגלות מודל יחיד, טיפוס יחיד של ארגון בכל ממלכת־החי.

קוביָה ניתק בדיוק את הרציפות הזאת. תוכנית הארגון הפכה להיות המקום שבו באות לידי ביטוי שתי סדרות של משתנים: האחת מחוץ לגופים החיים, האחרת בתוך הגופים החיים. 'החלקים השונים בכל יצור', אמר קוביה, 'חייבים להיות מתואמים באופן שיתאפשר קיומו של היצור בשלמותו, לא רק כשהוא לעצמו, אלא גם את קשריו עם מה שסובב אותו'.⁷¹ מצד אחד נמצא העולם, אשר בתוכו חי האורגניזם ואשר הוא קובע את מה שכינה קוביה 'תנאי הקיום' שלו. האורגניזם איננו מבנה מופשט החי בחלל הריק. הוא תופס מרחב מסוים שבו עליו לבצע את כל התיפקודים הנדרשים על־ידי החיים. האורגניזם מתפשט אל מחוץ לעצמו, אל האדמה שעליה הוא צועד, אל האוויר שהוא נושם ואל המזון שהוא בולע. 'תחום חיותו', אמר קוביה, 'חורג מעבר לגבולות הגוף החי עצמו'.

הוא ערוך במסות קונצטריות סביב גרעין. האיברים מסודרים בשכבות מהמרכז החוצה, החשוב ביותר במרכז, והחשוב פחות בחוץ. המהותי טמון איפוא במעמקי האורגניזם, ואילו החלקים החשובים פחות מוצבים על שטח־הפנים. לב הארגון כמעט לעולם איננו יכול להשתנות, היות שכדי לשנותו צריכים כל השאר להשתנות, וצריכים להחליף את התוכנית בתוכנית אחרת. לעומת זאת, איברים משניים יכולים להשתנות לפי הצורך. ככל שהם חשובים פחות, ולפיכך קרובים יותר לשטח־הפנים, כך הם יכולים להשתנות בחופשיות רבה יותר. 'כשבוחנים את שטח־הפנים, במקום שטבע הדברים התכוון כנראה למקם את החלקים החיוניים פחות, ואף מסוכן פחות אם ייפגעו', ציין קוביה, 'רואים שמיגוון הצורות נעשה כה רב, שכל עבודתם של תוקרי־הטבע עד כה עדיין לא הספיקה לתארן.⁷⁵ יצורים בני אותה קבוצה, הזהים זה לזה מבחינת מרכז הארגון, דומים פחות ופחות זה לזה ככל שמתקרבים אל שטח־הפנים. הם דומים זה לזה במה שחבוי, אך שונים זה מזה במה שנראה לעין. על שטח־הפנים ניתן למצוא סדרות רציפות קטנות של וריאציות רבות לאין ספור. בעומק יכולים להיות רק שינויים קיצוניים, רק דילוגים מתוכנית אחת למשנה.

בתחילת המאה ה-19 חל איפוא שינוי קיצוני בדרך שסודרו היצורים החיים במרחב: לא רק המרחב, שבו מוצבים כל היצורים, מפוצל לאיים נפרדים ומתולק לסדרות עצמאיות – אלא גם המרחב שבו התמקם האורגניזם, כלומר, מקופל סביב גרעין, נוצר עלידי שכבות שכבות המתפשטות אל מעבר ליצור החי, ומחברות אותו לסביבתו המיידית. החלוקה החדשה נערכה הן בהתאם ליחסים הנוצרים בין חלקיו של האורגניזם והן בהתאם לאלה המאחדים יחד את כל הגופים החיים.

התא

במאה ה-19 הצליחו הביולוגים להרחיב את מחקריהם בתחום הארגון לעוד רמה במבנה היצורים. נוסף למה שניתן לכוונתו כמקרו־ארגון – כלומר, מה שחקר הזואולוג כשניסה לגלות את

עולם־החי דומה איפוא לאיים קטנים מבודדים, שתעלות בלתי־עבירות חוצצות ביניהם. הצפּלופּודים, למשל, מוליכים 'לשום דבר אחר'. לא יתכן שהם תוצאת התפתחותם של בעלי־חיים אחרים, והתפתחותם 'לא יצרה שום דבר שהוא עילאי מהם'. דומה שהטבע 'מדלג' מתוכנית לתוכנית. בין התוצרים שלו הוא משאיר 'פער נראה לעין'.⁷⁴ כדי להבהיר באופן ברור לגמרי, עד כמה אין זה אפשרי לחבר את הקבוצות הגדולות של בעלי־החיים בסדרה רציפה, הקבוצות קרויות 'ענפים'. אין שום שלבי־ביניים בין שני הענפים הראשונים. בין רכיכות לחולייתנים אין שום דבר משותף ושום קווי־דמיון – במספרם או בחלקיהם או בארגונם. רק בתוך כל קבוצה, כאשר מטפסים על הענף, נמצאות הסדרות, וגם אז אין הן ליניאריות.

דיונון הרוקחים והצפּלופּודים הם כה מסובכים, עד שאי־אפשר למצוא בעלי־חיים אחר כלשהו שניתן להציבו בצורה המתקבלת על הדעת ביניהם לבין הדגים. ובתוך המחלקה שלהם יש סדרה של התנוונות של תוכנית משותפת, המתבצעת ממש כמו בקרב החולייתנים; וכך ניתן לעבור מדיונון הרוקחים לצדפה, בערך כמו מאדם לקרפיון; אולם אין אפילו קו אחד המוליך מענף אחד למשנהו.

סוף־סוף נותקה השרשרת: השרשרת שאיחדה עד אז את כל היצורים החיים יחד, כאילו היה תמיד מספר אינסופי של שלבי־ביניים, כדי למלא את הפערים שבין שני אורגניזמים שיש ביניהם קירבה. נבעה פירצה לא רק בין היצורים לדברים, אלא גם בין קבוצות של יצורים. מאז ואילך כבר לא היה אפשר להתקדם דרך ממלכת־החי בסדרה אחת ויחידה של דרגות ודקויות. גם לא היה אפשר להמשיך מקצה אחד לקצה האחר על־ידי הוספת מבנה קטן, מורכבות קטנה, שיפור קל. בכל עולם־החי התקיימו אותן דרישות תיפקודיות. הכול צריכים להיזון, לנשום ולהתרבות, אם באוויר ואם במים, באקלים חם או קר, באור או בתושך. מכאן ואילך הרציפות מוקמה בתיפקודים, לא באמצעים המבצעים תיפקודים אלה. כדי להעמיד יצורים ולהתאים את ארגונם לתנאי הקיום, הטבע התקדם בדילוגים ובקפיצות. לפי קוביה, בעל־החיים מקופל סביב 'מרכז ארגוני', המכתיב את הסידור הפנימי של המבנים שלו.

מיגוון צורותיהם, מבצעים תמיד את אותם תיפקודים. ובסוגיית המבנה הפנימי של האיברים, כבר אין לחלק את היצורים החיים לבעלי-חיים בעלי דם חם, יונקים או זוחלים, אלא יש גידים וכלי-דם, עצמות או קרומים, המבצעים תמיד את אותו תפקיד ובהכרח ניחנים באותו טבע. אם יש הבדלים בין שריר של יונה לשריר של צפרדע, הם נובעים רק משום שאחד נמצא בציפור והאחר בדו-חתי. הדבר גם נובע מסיבות היצוניות: ההבדל בתפקידים ובסביבה המיידית. תיפקודים דומים תובעים אחידות מבנה.

לעומת זאת, לדעת פינל ובישה, לא יתכן שהרכבם של איברים שונים, המבצעים תפקידים שונים באותו יצור חי, יהיה דומה. 'די בהרהור הקל ביותר', אמר בישה, 'כדי להבין שאיברים אלה חייבים להיות שונים זה מזה, לא רק באופן סידורו ואריגתו של הסיב היוצר אותם, אלא גם בעצם טיבו של הסיב עצמו; ההרכב שונה וגם הרקמה שונה.'⁷⁶ כלומר, לא רק הצורה בלבד היא המעניקה לאיבר את תכונותיו, אלא בראש ובראשונה טבעה של הרקמה שהוא מורכב ממנה. במבט ראשון נראה, שבגופים חיים יש מיגוון רב של רקמות. אולם זוהי רק התרשמות שטחית, שכן הרקמה היא אופיין לא של האיבר, אלא של ה'מערכת': עצבים, הובלת הדם, שרירים, עצמות או גידים. המערכת מייצגת את נקודת המיפגש בין האנטומיה לפיסיולוגיה בגלל איכותה של הרקמה שממנה היא בנויה. גוף חי גדוש איפוא בשכבות של רקמות, יריעות של קרומים העוטפים כמה איברים, ומחלקים את הגוף לאזורי תיפקוד עיקריים. האיבר מייצג רק קטע מסוים באותו איזור, את הצורה שהרקמה מקבלת בחלק אחד של המערכת. יהיה אשר יהיה מקומו של איבר והקשרים שלו עם האיזור מסביב, צריך לייחס אותו הן למערכת שלו עצמו, כדי לקבוע את תפקידו, והן לרקמה שלו, כדי להבין את תכונותיו.

אולם, כאשר בודקים את המירקם, העובי והפעילות של הרקמות ולא דווקא את צורתן החיצונית, מסתבר שמיגוון הרקמות מצטמצם לטיפוסים מעטים: בין עשרה טיפוסים לעשרים ואחד טיפוסים – לפי האנטומאים שמדובר בהם. לדעת בישה, מתברר שהטבע 'אוזיד תמיד בתהליכיו, מגוון רק בתוצאותיו, חוסך

התוכנית המתאמת תיפקודים מעבר לאיברים המפותלים זה בתוך זה – התגלה המיקרו־ארגון של היצורים החיים. זה היה המבנה הפנימי ביותר של גופים מאורגנים, הרכבם היסודי, אשר למרות רבגוניות הצורות העניק לחומר של כל יצור איכות מיוחדת, מירקם, אוסף של תכונות שאין למצוא בגופים אי־אורגניים.

לעתים קרובות מייחסים את גילוי התא לחוקרי המאה ה-17. אמנם, בחקר חתכים של שַׁעַם וסוגים מסוימים של רקמת פְּרִנְכִימָה מצמחים תחת המיקרוסקופים הראשונים, הצליחו רוברט הוק, מלפיגי, גרו ולבנהוק להבחין בשורות של חלליות, שהוק כינה בשם 'תאים', אך לא היה אפשר לערוך הכללה למבנים אלה או לעשות בהם שימוש. כשניסו מופרטואי ובופון לייחס אירציפות לחומר של היצורים, כשהעלו את הרעיון בדבר היסודות המרכיבים אותם, הם לא התנהגו אלא כתלמידים נאמנים של ניוטון. חלקיקים חיים ומולקולות אורגניות היו אך ורק האמצעי שאיפשר להחיל על הגופים החיים את טבעו הבלתי־רציף של החומר, ולהציב את עולם היצורים החיים בצד עולם האובייקטים הדוממים, בהתאם לדרישות המכניקה במאה ה-18. אך כדי שתכונות היצורים יתאימו למבנה החומר, צריך היה להעלות על הדעת מולקולות מטיפוס מיוחד, השמורות אך ורק לגופים חיים. בסופו של דבר, רק טבען המיוחד של המולקולות שלהם הוא שייחד את הרכבם של היצורים החיים מהרכבם של האובייקטים הדוממים. אולם במאה ה-18, היסוד הרכיבי של הגופים החיים הוא שהיה היעד הסופי של הניתוח האנטומי, מה שנמצא בעת חיתוך שרירים, עצבים וגידיים: הסיב. יתרה מזו, ברוב האיברים, הסיב הוסיף להיות עניין שבהיגיון, מה שניתן להעלותו על הדעת כצבר של מולקולות המחוברות זו לזו על־ידי חומר צמיג, 'גְּלוֹטֶן'. האלר אמר, שסיב מסוג אחד ותו לא משמש ליצירת כל האיברים. אותם סיבים נארגים ברשת רציפה, המתפשטת מעצם לגיד, מגיד לשריר, משריר לעצב ולכלי־דם. אופן סידורם של הסיבים, מירקם הרשת שיצרו וכמות הנוזלים שנאגרו ברשת הם המקנים לאיבר תכונות של יציבות או רפיון, קשיחות או גמישות.

במאה ה-19 חל שינוי במצב. אותם איברים, טענו חוקרים, למרות

והולכות ומתפשטות ממבנה אחד לזה שעלי־ידו. באופן זה, ההתאמה בין מערכות תיפקודיות הפכה לפשטותה של המערכת המצורפת האנטומית.

הרציפות של הרקמה תאמה במידת־מה לכוליות של היצור החי, שאותה הדגישה כלי־כך הביולוגיה בתחילת המאה ה-19. מעתה כבר לא היה אפשר לחלק גוף חי למספר אינסופי של חלקים. מעתה כבר לא היה אפשר להעלות על הדעת שהוא התאגדות של יסודות, כפי שטענו מופרטואי ובופון. אפילו כששב אוקן והעלה את הרעיון שיצורים מורכבים מיסודות, הוא לא התכוון ליחידות אוטונומיות המחזקות ביחד, אלא ליחידות הממוזגות יחד בכוליות של האורגניזם השלם. הרעיון החדש של אוקן, אשר ממנו עתידה היתה להתפתח בהדרגה תיאוריית התא, היה לבחון את גופם של בעלי־חיים גדולים לעומת יצורים מיקרוסקופיים, ולראות את האחרונים כיסודות של הראשונים – בקיצור, לדמיון את האורגניזם החי המורכב כהתאגדות של אורגניזמים חיים פשוטים. כשמוות והרס פוגעים בהם, בשרם של בעלי־החיים ורקמותיהם של הצמחים מתפרקים למספר אינסופי של 'אינפוזוריה'. דומה שכל אחד מהיצורים הזעירים האלה מורכב מטיפה של מוקוזה, אותו חומר דביק הנמצא בכל היצורים החיים. לדעת אוקן, בעלי־החיים הזעזערים, שהשתחררו באופן זה אחרי המוות, אכן מייצגים את היסודות המרכיבים את היצורים החיים: סדורים בחלליות או בתאים, הם יוצרים את הרקמות של גופים חיים. אולם כדי שבעל־החיים יישאר שלם, התאים אינם נערמים יחד סתם בעלמא כגרגרים בערימה של חול. 'ממש כפי שחמצן ומימן הופכים להיות מים', כתב אוקן, 'וכספית וגופרית לצינֶבֶר, גם כאן נעשית חדירה הדדית אמיתית, שזירה והאחדה של כל היצורונים.'⁸⁰ לפיכך אין שום אית־אמיות בין מושג הרכב היצורים החיים מיסודות ובין זה של כוליותם, כל עוד נחשב האורגניזם לשילוב של יחידות ורקבונו אחרי המוות להתפרקות. יחידות־היסוד אינן יכולות להתאגד בעלמא ולקיים את האינדיבידואליות שלהן ביצור השלם. הן צריכות להתמוזג לישות חדשה, שהיא מעל ומעבר להן. החלקים נמסים בשלם.

באמצעים שהוא משתמש בהם ונודיב בתוצאים שהוא מפיק מהם; הוא משנה באלפי דרכים את העקרונות הכלליים המעטים, השולטים בכלכלה שלנו ויוצרים את תופעותיה הרבות לאין ספור, כשמיישמים עקרונות אלה באופן שונה.⁷⁷ על-ידי סיווג קרומים בהתאם למבניהם, תכונותיהם ותפקידם, ניתן להבחין בשתי קבוצות עיקריות: קרומים פשוטים, 'שקיומם הנפרד קשור לחלקים הסמוכים להם רק בקשרים ארגוניים עקיפים'; וקרומים מורכבים, שנוצרו על-ידי 'התחברות של שניים שלושה קרומים פשוטים – פעולה שאיחדה את תכונותיהם האופייניות, שלעתים קרובות שונות עד מאוד זו מזו'.⁷⁸ בסופו של דבר, תכונות ויטליות ממוקמות ברקמות, וסגולות האורגניזם בהתאגדות הרקמות האלה. כל יסוד, כל מבנה, גזור מרקמה, כשם שבגד נגזר מפיסת בד. כשם שגוף חי מורכב מאוסף של איברים, שכל אחד מהם תורם לתכונותיו של השלם על-ידי ביצוע תיפקוד, כן איבר מורכב מכמה רקמות הארוגות זו בזו; כל אחת, בבצעה את תפקידה, מעניקה טווח רחב של תכונות למבנה בשלמותו. די איפוא במספר קטן של רקמות כדי ליצור גיוון בעולם החי. בישה אמר, ש'לכימיה יש גופים פשוטים, אשר על-ידי צירופיהם השונים נוצרים גופים מורכבים... באותו אופן, לאנטומיה יש רקמות פשוטות, אשר על-ידי צירופיהן... נוצרים איברים'.⁷⁹

עם בישה הופיעה איפוא רמת ארגון חדשה, רמת-ביניים בין האיבר למולקולה. הרקמה ייצגה את הנקודה הסופית של הניתוח בידי האנטומאי, זו שעדיה יכול היה להביא את הגוף החי באמצעות איזמל מנתחים ומספריים. תכונותיו של אורגניזם או של חלקיו אינן טבועות במולקולות של החומר היוצר אותו. למעשה, הן נעלמות ברגע שהמולקולות מתפזרות ומאבדות את הארגון שלהן. הסידור של המולקולות שלו ברקמה הוא המעניק לחי את תכונותיו הפנימיות. הרקמות הן חומרי-גלם, וכל סוג נועד למלא תיפקוד מיוחד במיגו. יש רקמות שונות בסחוסים ובבלוטות, ממש כפי שיש בדי כותנה לחולצות ואריגים עבים למעילים עליונים. המלה 'רקמה' כשהיא לעצמה מציינת את רציפותו של המבנה. מה שהיצור החי מורכב ממנו הן השכבות והיריעות הרציפות, המתפתלות לתוך איברים, משתזרות ביניהם, מפרידות ביניהם ועוטפות אותם יחד,

ובפוף, לא ניתן להפריד בין חקר הרבייה ובין חקר הרכבו של האורגניזם. חשיבותה של תיאוריית התא נובעת מן הפתרון המשותף שנתנה לשתי בעיות שונות לכאורה: בכך שפירקה את היצורים החיים לתאים, שכל אחד מהם ניתן בכל תכונות החיים, היא סיפקה להתרבותם הן משמעות והן מגנון.

בדיוק באותם ימים החל כוח ההפרדה של המיקרוסקופ להשתפר. בחינת הרקמות בכל מקום גילתה חלליות, שלחופיות, תאים – הדוקים יחד פחות או יותר, דבוקים יחד פחות או יותר, לעתים מופרדים על-ידי תעלות. תחילה בצמחים, שם ניתן היה לראותם ביתר קלות בשל גודלם וצורתם; אחר-כך ברקמות של בעלי-חיים. אפילו אורגניזמים מיקרוסקופיים מסוימים נראו כמו תאים. באמבה, למשל, לא היו כל איברים מובחנים, אלא, לפי דוֹז'ארדן, טיפה יחידה של 'חומר צמיג, שקוף ובלתי-מסיס במים, הנצמד למחטי הניתוח, מתכווץ בגושים גלובולריים ומאפשר למתוח אותו לחוטים דמויי מוקוזה'.⁸¹ תומר זה כונה תחילה בשם 'סֶרְקוּד' בפי דוֹז'ארדן, ולאחר מכן 'פרוטופלסמה' בפי פוֹרְקִינְה ופון-מוהל. כאשר השתמשו בחום ובחומצות להפריד רקמות צמחיות, נראו תמיד אותן שלחופיות, אותם כדורים עטופים בקרומים. געשה שימוש בתמיסות שונות להספגת רקמות, כדי לצבוע באופן שונה אזורים מסוימים של התא. בהדרגה הופיע התא לא כטיפה של מוקוזה ותו לא, אלא כמבנה קטן שבתוכו ניתן היה להבחין בתנועה קבועה של אזורים שונים, חללים, וגרגרים. מעל לכול, נמצא שכל תא מכיל מסה יחידה צפופה וכהה, שבראון כינה אותה בשם 'גרעין'. מבלי להתחשב בצורתו או בתיפקודו של התא, מבלי להתחשב במיקומו באורגניזם, אם הוא מצוי בצמחים או בבעלי-חיים, מראהו הכללי תמיד דומה, כאילו הוא מציינת תמיד לאותה תוכנית יחידה.

לעין המצוידת במיקרוסקופ, כל יצור חי נראה בסופו של דבר כאוסף של יחידות מצומדות. זו היתה מסקנתם של רוב ההיסטולוגים, מסקנה שהוכללה תחת השם 'תיאוריית התא' – לצמחים על-ידי שלִיידן, ולבעלי-חיים על-ידי שוואן. אולם תיאוריית התא לא עסקה אך ורק בסוגיית המבנה. לדעת שוואן, כבר אין התא הנקודה הסופית בנייתו של יצורים חיים; הוא הפך

וכן סללה נקודת-המבט של הביולוגיה דרכים חדשות לבחינת המבנה העדין של היצורים החיים. במאה ה-18, הרעיון שחלקיקים חיים מתלכדים והופכים לאורגניזם בגלל הזיקה ביניהם ייצג רק היבט אחד של המערכת-המצורפת המונחת ביסוד היווצרותם של כל הגופים ביקום. מולקולות אורגניות היו רק קטגוריה אחת מסוימת של מולקולות, השמורה ליצורים חיים. מאחר שאין הן ניתנות להריסה, כל אחת מהן, משהשתחררה לאחר המוות, יכולה להתרכב בצירוף חדש ולהופיע שוב בגוף חי. באותה תקופה, תכונותיו של אורגניזם ייצגו רק את סכום התכונות של כל אחת מהמולקולות המרכיבות אותו. ואילו במאה ה-19 חל שינוי מוחלט. הביולוגיה, שהתמקדה עכשיו בארגון של חיים ולא דווקא בצורות של היצורים, יכלה לקבוע מהו הקשר בין האורגניזמים המורכבים ביותר ובין האורגניזמים הפשוטים ביותר. משום שראתה את האורגניזם הקטן כיסוד של האורגניזם הגדול, היא חיפשה עתה מהו המכנה המשותף של כל היצורים החיים, כלומר, היא חיפשה את היחידה הבסיסית, כביכול, של בעל-החיים או הצמח. מעתה, יחידה זו כבר איננה יכולה להיחשב למולקולה פשוטה, יסוד אינרטי או חלק מתומר. יחידה זו עצמה היא גוף חי, תצורה מורכבת, היכולה לנוע, להיוון ולהתרבות; למעשה, גוף הניחן בכל הסגולות העיקריות של חיים. אך בעל-חיים או צמח אינם יכולים להיות מסה ששורצים בה יצורים קטנטונים עצמאיים. כדי להתייחס לאורגניזם – אחדותו, תיאומו ובקרתו – כמשהו המורכב מיסודות חיים, צריך היה להסכים שיסודות אלה אינם דבוקים יחד ותו לא, אלא משולבים. היחידות צריכות להתמוג ביחידה אחרת מסדר גבוה יותר, הן צריכות היו להיות כפופות לשליטתו של האורגניזם ולוותו על עצמאותן למען זו של האורגניזם השלם. רק במחיר זה יכול היה יצור שאיננו ניתן לחלוקה להיות מורכב מיחידות-יסוד. מעתה כבר אין האורגניזם קולקטיב, אלא הוא מונוליט.

רק לאחר שהתקבלה האפשרות של יחסים כאלה בין יצור חי ובין חלקיו הרכיביים, יכלו להבין את התאים, את החלליות ואת דגם חלת-הדבש שנוראו ברקמות מסוימות מאז המאה ה-17. בתוך שנים מועטות נערכה סדרה שלמה של תצפיות הן במבנה העדין של צמחים ובעל-חיים והן בהתרבותם. שכן, כפי שהראו מופרטואי

שוואן טען, שכל התצפיות שנערכו בצמחים ובבעלי־חיים מאשרות את ההשקפה השניה. מהי ביצית של בעל־חיים, אם לא תא המסוגל להתפשט ולהתחלק, הוא בעצמו – במיוחד ביציות של נקבות המתרבות ברביית בתולים (פרתנוגוזה), שהרי במקרה שלהן אי־אפשר לזמן כוח מיסתורי שאותו סיפקה ההפריה? מהו נבג שממנו מתפתחים צמחים ירודים מסוימים? ובצמחים מסוימים, האם לא ניתן להרחיק מיקטעים, אשר בכל זאת מתחלקים אף־על־פי שהורחקו מהאורגניזם ההורה? לפיכך אין כל סיבה לייחס לצמח השלם תכונות מיוחדות. 'גורמי התזונה והגדילה אינם מצויים באורגניזם בשלמותו, אלא בחלקי־יסוד נפרדים – בתאים', הסיק שוואן.⁸³

פירוק האורגניזם ליחידות־היסוד שלו איננו הורס משום כך את יכולתו להיזון, לגדול ולהתרבות. יחודיותו של החי איננה סגולה של האורגניזם בשלמותו. 'כל תא מנהל חיים כפולים', כתב שליידן. 'הוא עצמאי, כשמדובר בהתפתחות שלו עצמו; הוא מתוון, בהיותו חלק משולב של צמח.'⁸⁴ מעתה כבר לא היה אפשר להתייחס לאורגניזם כאל מבנה מונוליטי, מין אוטוקרטיה אשר אלה שהיא שולטת בהם אינם שותפים לכוחותיה. אלא הוא נעשה 'מדינה תאית', מערכת משותפת שבה, אמר שוואן, 'כל תא הוא אזרח'. ואם כי נבנו על־פי אותה תוכנית, תאיו השונים של אורגניזם הם מטיפוסים שונים ומבצעים תיפקודים שונים ברקמות שונות; כל טיפוס ממלא שליחות מסוימת עבור הקהילה כולה. בקהיליית התא יש חלוקת מטלות וחלוקת עבודה. קיומו של אורגניזם תלוי איפוא בשיתוף־הפעולה של חלקיו. אף־על־פי שהאורגניזם קובע את התנאים, אין הוא סיבת קיומו שלו.

אם כן, תכונות החי חייבות לשכון בתא, לא בהכרח בגלל כוח מיסתורי כלשהו, הפועל בשירותה של תבונה אלוהית, אלא דווקא בשל סידור מוגדר של מולקולות, המאפשר לתא לקיים ריאקציות כימיות מסוימות. לפי שוואן,

ניתן לסדר את התופעות האלה בשתי קבוצות טבעיות: ראשית, אלה המתייחסות לצירוף של מולקולות היוצרות תא, ויכולות להיקרא

להיות הן יחידת החיים – המרכיב שניחן בכל תכונות החיים – והן נקודת ההתחלה של כל אורגניזם.

חלקי-היסוד של כל הרקמות נוצרים מתאים באופן אנלוגי, אם כי מגוון ביותר, כך שניתן לקבוע כי יש עקרון התפתחות כללי לכל חלקי-היסוד של האורגניזמים, שונים ככל שיהיו, ועיקרון זה הוא היווצרות התאים.⁸²

מאז ואילך כבר לא נודעה חשיבות לעובדה שתאים נמצאים בכל הרקמות, וגם לא לעובדה שכל האורגניזמים בנויים מתאים; אלא רק לעובדה שהתא עצמו ניחן בכל סגולות החיים, ושהוא מייצג את המקור ההכרחי לכל גוף מאורגן.

לפיכך הנחיתה תיאוריית התא מהלומה על הוויטליזם, שהיה חשוב כל-יך בשנותיו הראשונות של מדע הביולוגיה, ודחתה את אחת מהנחות-היסוד שלו. כדי לערוך הבחנה בין החי לדומם נאלצו בעבר לראות כל יצור ככוליות שאיננה ניתנת לחלוקה. זואולוגים, אנטומאים וכימאים, כולם טענו שהחיים מצויים באורגניזם בשלמותו ולא בשום איבר, חלק, או מולקולה. מאחר שלא ניתן לצמצם ליסודות פשוטים, גשאו החיים בלתי-נגישים לניתוח ולפירוש. זהו מקור הדרישה לרציפות במבנה הפנימי של אורגניזמים, רציפות שמצא בישה במירקם הרקמות, ואוקן באיחוי של תאים ל'מסה אינפוזורית', שלתוכה נעלמת האינדיבידואליות של כל יסוד. שוואן בא לערער בדיוק על רעיונות אלה בדבר כוליות ורציפות, כאשר בחן לא רק את מבנה-היסוד של אורגניזמים חיים, אלא גם את הגורמים הקובעים שתיים מתכונותיהם העיקריות: תזונה וגדילה. לדידו של הוויטליסט, גורמיהן של שתי תופעות אלו מצויים באורגניזם השלם. על-ידי צירוף המולקולות בשלם מתחולל כוח המאפשר לאורגניזם למשוך אליו חומרים מן הסביבה הקרובה ולהשיג מהם את המרכיבים הדרושים לו לגדילה של כל חלקיו. שום חלק כשהוא לעצמו איננו מסוגל להזין את עצמו ולגדול. אולם באותה מידה גם ניתן לטעון, שהמולקולות בכל תא מסודרות באופן שהתא יכול למשוך מולקולות אחרות ולגדול בעצמו. ואז לא ניתן לייחס עוד את תכונות החיים לשלם, אלא לכל חלק – לכל תא – הניחן באופן כלשהו ב'חיים עצמאיים'.

בעקבות עבודתו של וירכזב נגנזה האפשרות של הופעת תא ממגמה אורגנית. 'במקום שקיים תא חייב היה להתקיים תא קודם, בדיוק כפי שבעל־חיים מופיע רק מבעל־חיים, וצמח רק מצמח.⁸⁸ רציפות הצורות והתכונות במהלך הדורות תקפה לא רק בבעלי־חיים ובצמחים, אלא גם ביחידות המרכיבות אותם. תיאוריית התא קיבלה אז את צורתה הסופית, כמסוכם בדבריו של וירכזב: 'כל בעל־חיים נראה כסכום של יחידות ויטליות, שכל אחת מהן נושאת את אופייני החיים במלואם.'⁸⁹

בעקבות תיאוריית התא, כבר לא ביססו את הרכב היצורים ותכונותיהם על דרישותיה של מערכת, אלא על אובייקטים שניתן לראותם בתצפית. בסופו של דבר, אנליזה הצליחה לאשר את הכורח הלוגי של מערכת־מצורפת, כמו זו שחיפשו מופרטואי ובופון. יהיה אשר יהיה טבעו של אורגניזם, אם הוא בעל־חיים, צמח או מיקרואורגניזם, תמיד הוא עשוי מאותן יחידות־יסוד. סידור התאים, מספרם ותכונותיהם הם הנותנים לאורגניזם את צורתו ואת איכויותיו. ואם כי התא הוא מושא מחקרי מורכב עד מאוד, אותו עקרון בניה פועל הן בעולם־החי והן בעולם־הדומם. עם התא גילתה הביולוגיה את האטום שלה. תיאוריית התא שינתה מן הקצה אל הקצה כל היבט והיבט של חקר האורגניזמים החיים. מעתה ואילך, כדי לאפיין חיים, מוכרחים היו לחקור את התא ולנתח את מבנהו: להצביע על המכנים המשותפים, החיוניים לחיים של כל תא, או לחלופין לזהות את ההבדלים, הקשורים בביצועם של תפקודים מיוחדים.

תחום הביולוגיה שחלו בו השינויים הבולטים ביותר בזכות תיאוריית התא היה חקר הרבית. עד אותם ימים, הביולוגים בני המאה ה-19 פשוט הוסיפו לחקור תחומים שראשיתם היתה במאה ה-18. בהדרגה, שכלול המיקרוסקופ ותצפיות דקדקניות יותר הובילו לקיצו של הטיעון הישן בדבר היווצרות־מוקדמת ואפיגנזה. פֶּרְבּוּס והכימאי ז'. ב. דומא סיננו נוזל ספרמטי והראו באופן מוחלט שיצורונים – 'זואוספֶּרְמִים' – הכרחיים להפריה. החוקרים הכירו בעובדה שביצית הנקבה איננה הזקיק אשר ראה דה־גראף בשחלה, אלא המסה הלבנבנה שמצא פון־באר בתוך הזקיק. התפתחות

התופעות הפלסטיות של התאים; שנית, אלה המתקבלות משינויים כימיים המתרחשים בחלקיקים הרכיביים של התא עצמו, או בציטופלסמה שמסביב, ויכולות להיקרא התופעות המטבוליות.⁸⁵

אפשר לראות את התא כפרטי-יחיד שהקרום שלו מפרידו משאר העולם. ובכל זאת, אף-על-פי שהקרום מבודד את התא, הוא גם מאפשר לתא ליצור יחסים עם סביבתו, לקחת ממנה מזון ולהפריש אליה חומרי פסולת. צריך לייחס לקרום תכונות מיוחדות, כדי להסביר את יכולתו להבחין בין תכולת התא ובין הסביבה המיידית שלו. יש לייחס לקרום, אמר שוואן,

לא רק את הכוח לשנות באופן כימי חומרים שהוא בא במגע עמם, או שספג אותם, אלא גם את הכוח להפרידם באופן שחומרים מסוימים יופיעו בצידו הפנימי ואחרים בצידו החיצוני. ללא כוח מעין זה של התאים, לא ניתן להסביר את ההפרשה של חומרים שכבר מצויים בדם, כמו, למשל, שתן, על-ידי התאים המצפים את פנים צינוריות השתן.⁸⁶

לדעת שוואן, אין כל צורך לחפש כוח מיסתורי. ידוע שזרם חשמלי גורם להתפרקותם של חומרים מסוימים ולהפרדת מרכיביהם. מדוע אין לומר, שתכונות הקרומים מקורן במיקום האטומים המרכיבים אותם? כדי להסביר תופעות ויטליות, די להניח שמדובר כאן בכוחות הפועלים, כמו כוחות פיסיקליים, 'בהתאם לחוקים קפדניים של כורח עיוור'.⁸⁷

ההיבט השני של תיאוריית התא עסק ביצירתם של תאים ואורגניזמים. מעתה כבר אין זו שאלה של הרכב ומבנה, אלא של מוצא. כל אחד יכול היה לראות תא המתחלק לשניים, ממש כפי שזיבולד ראה את ההתחלקות וההתרבות של פרוטיסטה, אותם אורגניזמים המורכבים מתא פשוט. את האורגניזם ניתן להשוות למושבה של פרוטיסטה, ואת גופו של בעל-חיים כמתפתח מביצית בסדרה של חלוקות-תא. אולם שליידן ושוואן הניחו, שאם כי אוכלוסיית תאים מתרבה על-ידי חלוקת-תא, לא כל תא נגזר בהכרח מתא אחר. בתנאים מסוימים, תאים יכולים להיווצר גם במעין בריאה ספונטנית, המתחילה מ'בלקטמה פרימיטיבית'. רק

התפתחותם, לא היינו לומדים דבר, היות שרגלי חרדונים ויונקים, כנפי ציפורים ורגליהן ואפילו ידי אדם ורגליו, כולם מופיעים מתוך אותה צורה בסיסית.⁹¹

הוא הדין בזחלים של פרפרים, זבובים וחגבים: לעתים קרובות הזחלים דומים יותר זה לזה מאשר החרקים המושלמים.

את האי־רציפות בעולם־החי, שאותה גילו חוקרי האנטומיה המשווה, מצאו גם האמבריוולוגים במהלך מחקרי־התפתחות משווים. כשהשווה את הסגמנטציה של הביצית, את תנועת השכבות ואת הסדר שלפיו הופיעו איברים שונים, לא מצא פון־באר סדרה רציפה בכל ממלכת־החי, אלא דווקא קבוצות או 'טיפוס' של התפתחות. למעשה, הוא הבחין בארבעה טיפוסים עיקריים, המקבילים לארבעת הענפים של קובֶיה. בכל קבוצה וקבוצה היתה ההתפתחות העוברית שונה באופן קיצוני, ואילו בתחומי אותה קבוצה היא היתה דומה. גם כאן, אילוּצי הארגון הגבילו את מספר הווריאציות האפשריות, לא רק במרחב אלא גם בזמן. תחילה הופיעו הפעולות החשובות ביותר, המרכזיות ביותר והעמוקות ביותר. 'המאפיינים הכלליים ביותר של קבוצה גדולה מופיעים בעובר לפני המאפיינים המיוחדים יותר', כתב פון־באר. 'המבנים שהם כלליים פחות וולדים מהמבנים הכלליים יותר, וכך הלאה, עד שלבסוף מופיעים המאפיינים המיוחדים ביותר'. את החולייתן ניתן לזהות בעובר לפני שמזהים את הציפור. דומה שיש היסטוריה עוברית: כדי ליצור ארגון בסיסי, המשותף לקבוצה נתונה, דומה שכל בני הקבוצה התחילו את דרכם בנתיב משותף, המושלמים פחות מבני הקבוצה עצרו במהלך הדרך לפני בני הקבוצה המושלמים יותר.

מעתה לא היה אפשר עוד להתייחס לביצית כאל מבנה נוקשה, שממנו יצאה צורה שכבר היתה מוכנה. הביצית נחשבה למקורה של מערכת, שבתוכה מתרחשת סדרה שלמה של שינויים, בזה אחר זה, וכל שלב נושא בחובו את האפשרות של השלב הבא אחריו. מסתבר שבמהלך התפתחותו העוברית, האורגניזם החי נוצר ברצף של אירועים, כל אחד מתחולל מזה שקדם לו, כאילו הארגון הולך

העובר לאחר ההפריה היתה לנושא של מחקר שיטתי, והתופעות שכבר תוארו על־ידי ק. פ. וולף כמאה שנה קודם לכן הוצגו עתה בפירוט רב יותר. מה שראה פון־באר לאחר הפרייתה של ביצית לא היתה התפתחות של אורגניזם קטן שנוצר־מוקדם, אלא סדרה של אירועים מורכבים, אשר מהם הלכו והופיעו בהדרגה הצורות והמבנים של הבוגר העתידי. בתחילה, הביצית איננה אלא מין כדור קטן, ה'מתפלג' לשניים, אחר־כך לארבעה, ואחר־כך למספר גדול של חלליות הדבוקות יחד. בהדרגה נוצרים קפלים, 'עלעלים' הגולשים זה על גבי זה, מתקפלים, מסתלסלים ומשתגנים כדי ליצור את האיברים. 'כשמדובר באופן התפתחות החולייתנים', אמר, הרי תחילה נוצרים ארבעה עלעלים במישור המדיאני האורכי.

שניים מהם נמצאים מעל לציר ושניים מתחתיו. במהלך התפתחות זו, הנבט מתחלק לשכבות, וזה משפיע על חלוקת הצינוריות העובריות למסות משניות. אלה האחרונות, הכלולות במסות אחרות, הן האיברים הבסיסיים אשר להם הכושר ליצור את כל האיברים האחרים.⁹⁰

במין נתון, התפתחות העובר מתרחשת תמיד באותה דרך, באותו סדר בזמן ובמרחב, כאילו היא פועלת על־פי תוכנית מסוימת. בתחילה מתרחשת הגדרה הדרגתית של גוף בעל־החיים, ככל שהולכת וגדלה ההתמיינות של צורתו ורקמותיו. אחר־כך, צורות ששורטטו בקווים גסים מתעדנות בהדרגה ומקבלות את צורתם של מבנים מומחים יותר.

כאשר הושוו מינים סמוכים באותה משפחה, נמצאו בהתפתחותם קווי־דמיות מפליאים, מה שכינה פון־באר בשם חוק ההתאמות העובריות.

יש ברשותי שני עוברים קטנים בכוהל, שלא רשמתי את שמותיהם, וכרגע אינני יכול לומר כלל לאיזו מחלקה הם שייכים. יתכן שהם חרדונים או ציפורים קטנות, או יונקים צעירים מאוד, כה מושלמת היא הדמיות בדרך יצירת הראש והגן של בעל־חיים אלה. אולם הקצוות [גפיים] עדיין חסרים בעוברים אלה. אך אפילו אם היו קיימים בשלב המוקדם ביותר של

מוזרים, 'שנוצרו ללא אלוהים', כדברי שאטובריאן, בא הרעיון בדבר יצורים שהתפתחותם הופרעה, ולפיכך איבירהם גשאים במצב העוברי עד הלידה. דומה שהמומים עצמם אינם מופיעים באקראי. הם משפיעים על אזורים מסוימים בגוף יותר מאשר על אזורים אחרים, משנים את המבנה, כאילו ההתפתחות רק סתתה ממסלולה. יש כללים באנומליה. 'מפלצתיות כבר איננה אי־סדר אקראי', כתב איזידור ז'ופרואה סנט־הילר, 'אלא סדר אחר, סדיר באותה מידה וכפוף לכללים באותה מידה: זוהי תערובת של סדר ישן וסדר חדש, נוכחות סימולטנית של שני מצבים, אשר בדרך־כלל באים זה אחר זה.⁹³ לא כל טיפוסי המפלצתיות אפשריים. המומים שנוצפו תואמים לטיפוסים מסוימים. אפשר לסווג מפלצות ממש כמו שמסווגים יצורים גורמליים. אנומליות מציטות לכללים מסוימים של תיאום, זיקה וכפיפות. אנומליות אחדות הן תורשתיות, אך רובן הן תוצאה של פגיעה בעובר במהלך החיים העובריים. קִרְטוֹלוֹגְיָה, חקר המפלצות, עתידה היתה לתת לביולוגיה את אחד מכלי הניתוח העיקריים שלה.

עם חקר ההתפתחות העוברית ורצף שלבי ההתפתחות שנוצפו בביצית נעשה צעד גדול קדימה אל מעבר לתיאוריות הנושגות, שעדיין היו מקובלות בתחילת המאה. אולם עדיין לא היה אפשר לפרש את הצורות הנצפות בביצית, אלא רק לאחר שהושוו עם צורות של תאים ברקמות. אם התצפיות הקשורות ברביה ובהתפתחות העובר תרמו לכינונה של תיאוריית התא, הרי תיאוריה זו גם היא הוימה תרומה בכך שנתנה הסברים להיבטים השונים הרבים של גורציה. אחרי ככלות הכול, ה'זואוספרם', ממש כמו הביצית, הוא רק תא, אם כי תא בעל צורה ותיפקוד מיוחדים. הפריה היתה איפוא איחויים של שני תאים, אחד מהאב, השני מהאם. ההתפלגות וההיווצרות של שכבות הנבט, כפי שהן נראות תחת המיקרוסקופ הן תוצאה של חלוקת־התא והתמיינות הולכת ומתקדמת של התאים, העומדים לבצע תיפקודים מובחנים וליצור איברים. כל זה הולך למסקנה, אמר קִמְאָק,

שכל התאים, או שווי־הערך שלהם באורגניזם המפותח במלואו, נוצרו על־ידי התפלגות הולכת ומתקדמת של תא הביצית ליסודות שהם דומים

ונפרש בזמן כמו גם במרחב. לא רק הזמן של ההתפתחות האינדיבידואלית, הנמדד על-ידי גלישת השכבות והופעת האיברים, אלא גם זמן שהיה מרוחק יותר, עלום יותר, עמוק יותר, שבישר כמדומה סוג חדש של יחסים בין יצורים חיים מסוימים.

חקר האנומליות ההתפתחותיות החל מקבל חשיבות חדשה. שכן, עם ברוקה הופיע אמצעי חדש לחקר יצורים חיים. ניסויים בפיסולוגיה היו כרוכים בדרך-כלל בשינוי מצב הטבע של האורגניזם, כדי להפריע לתיפקוד זה או אחר. אולם ניתן לקבל אותה תוצאה על-ידי צפיה במצבים פתולוגיים מסוימים. מהי מחלה, אם לא עודף או חסר בתהליכים מסוימים, המתרחשים בבעל-חיים בריא? במקרים רבים, שום ניסוי איננו יכול לשחזר סטייה מנורמליות באופן כה מדויק וברירני. אם ברור שנוקקו לידע על המצב הפיסולוגי כדי לפרש תנאים פתולוגיים, הרי חקר התנאים הפתולוגיים גם המציא כלי חשוב לחקר התיפקודים הביולוגיים.

לפיכך, הסטטוס של מפלצות גם הוא השתנה. מעתה כבר לא היה אפשר לתלות את סיבת היווצרותן בזעם האל, הענושה על פגם סודי, או גמול על מעשה או אף מחשבה שלא כדרך הטבע. גם לא יתכן שיצורים אלה, המצויים בשולי הסדר הטבעי, הוכנו כבר בתחילת הזמנים והם מצפים, יחד עם האחרים, לתוך לצאת לאוויר העולם. לפי הביולוגיה החדשה, מומים נוצרים במהלך ההתפתחות העוברית בגלל נזק כלשהו שנגרם לעובר. אם מגעים בחווקה ביצי תרנגולת בזמן ההדגרה, מוצאים באפרוחים כל מיני סוגים של אנומליות. עד לאותם ימים, המפלצת, כדברי אטיין ז'ופרואה סנט-הילר, ביטאה את 'התגלותו של ארגון בימים של הוללות, שבהם, מאחר שעיף מליצור בחריצות רבה במשך זמן רב מדי [יצורים רגילים], הפץ להשתעשע ומתמסר לשגיונות [ויוצר מפלצות]'.⁹² מאז התייחסו למפלצת כמו אל 'יצור שנפגע במהלך החיים העובריים'. מפלצתיות איננה אלא תוצאה של נזק שנגרם לעובר, פְּשָׁלִים ברצף האירועים היוצרים בעל-חיים, שגיאות בביצוע התוכנית. אנומליות, אי-סדירויות ופגמים בתצורה גורמים בגלל התפתחות שנעצרה או נפגמה. במקום הרעיון בדבר יצורים ותוצרים

צורתו ותכונותיו של אורגניזם נקבעים על-ידי מספר התאים, מיגרון טיפוסיהם וכיצד הם סדורים. צירוף התאים הוא המבטיח את רבגוניותו של עולם־החי. אולם, כאשר תא נפרד מאורגניזם אחד כדי ליצור אחר, האורגניזם החדש מתפתח תמיד בדמותו של הישן. מדור לדור, כל תהליכי ההתפתחות, חלוקת התא והתמיינותו חוזרים על עצמם שוב ושוב בהתמדה, כך שאותו מבנה ואותה מערכת מופיעים תמיד מתא הביצית. תוכנית הארגון שנתגלתה על-ידי האנטומיה המשווה צריכה היתה בהכרח להתבסס על תוכנית התפתחות, המכוונת את התרבותם, התמיינותם וסידורם של התאים בביצית. אם התוכנית עקיבה, אם היא מתבצעת לפי הכללים, הילד נוצר באופן רגיל בדמות הוריו. אם התוכנית פגומה, או מבוצעת ברישול, מופיעים מומים. הביולוגיה עמדה איפוא לפני אותה בעיה שכבר מופרטואי ובפון הבחינו בה: התרבותו של ארגון על-ידי הקבצה של יחידות־יסוד מצריכה 'זיכרון' המועבר מדור אחד לדור הבא אחריו. במחצית הראשונה של המאה ה-19, רק 'תנועה ויטלית' יכולה היתה למלא את תפקיד הזיכרון ולהבטיח התרבות נאמנה. אולם יהיה אשר יהיה שמם וטבעם של הכוחות המעבירים את הארגון של ההורים אל הילד, מעתה צריך היה למצוא אותם בתא.

*

לאחר שהחליף הארגון את המבנה הנראה כמושא הניתוח המחקרי, קיבל חקר המערכות החיות מסגרת־התייחסות, שלתוכה אפשר היה לשבץ את נתוני התפישה החושית. במאה ה-19, ארגון זוהה עם חיים, מאחר ששימש נקודת־מיפגש לשלושה משתנים התלויים זה בזה הדדית: מבנה, תיפקוד, ומה שאוגוסט קונט כינה בשם *milieu* – סביבה. חיים יכולים להתקיים רק כל עוד שלושה פרמטרים אלה שרויים בהרמוניה. כל שינוי באחד מהם משפיע על האורגניזם השלם, המגיב בכך שהוא משנה את השאר. בסביבה מוגדרת, כתב קונט, 'אם נתון האיבר, מצא את תיפקודו, ולהיפך'.⁹⁷ פעולת־גומלין זו שימשה מכאן ואילך בסיס לניתוח תיפקודיהן ותכונותיהן של מערכות חיות. הביולוגיה עסקה בבדיקת הווריאציות הנוצרות בפרמטרים מסוימים בתגובה לשינויים, טבעיים או מכוונים,

מבחינה צורנית; והתאים היוצרים את הבסיס המוקדם של כל חלק או איבר בעובר, גם אם מספרם מועט, מהווים את המקור הבלעדי של כל היסודות שנוצרו (כלומר, תאים), אשר מהם מורכב האיבר המפותח.⁹⁴

היווצרותו של אורגניזם חי היא אכן ייצור־מחדש (re-production), מבנה שמחדשים אותו בכל לידה דור אחר דור. אך גם אם כבר אין מייחסים אותו להתפתחותו של יצורון שנוצר־מוקדם, אין זו אפיגנוזה שלמה, אין זו התארגנות פתאומית של חומר שעד כה היה גולמי. 'גופים מאורגנים', אמר פון־באר, 'לא נוצרו־מוקדם, וגם לא, כפי שמקובל לחשוב, צצים פתאום, ברגע מסוים, מתוך מסה חסרת־צורה'.⁹⁵ כל אורגניזם מקורו תמיד באחת מאותן יחידות היוצרות את החי, טיפה של פרוטופלסמה הארוזה במעטפת שלה, כלומר, מבנה שכבר ניחן בכל סגולות החיים. יש דרכי התרבות רבות: על־ידי התחלקות, כפי שקורה בפרוטיסטה; על־ידי רביית בתולים, כפי שהדבר קורה אצל מרבית הדבורניים; או על־ידי איחוי של שני תאי נבט, אחד אבהי ואחד אמהי, כפי שהדבר קורה אצל רוב בעלי־החיים והצמחים. אולם בלי קשר לאופן ההתרבות, אורגניזם חדש מופיע תמיד ממיקטע של אורגניזם. חיים מועברים על־ידי פיסה קטנה של ההורים, הניתקת מהם, מתפתחת ומתרבה, כדי ליצור ארגון הדומה לזה שממנו היא באה וכדי לרכוש עצמאות. לעולם אין ניתוק מלא בין דור אחד למשנהו; תמיד נשמר יסוד, תא המתפתח בהדרגה לאורגניזם. 'בכל הסדרות של הצורות החיות, בעל־החיים שלם או אורגניזמים מן הצומח, או חלקיהם הרכיביים, קיים חוק נצחי של התפתחות רציפה', כתב וירכוב.⁹⁶ חיים נולדים מחיים, ורק מחיים. היווצרות של אורגניזם מאורגניזם אחר היא תמיד שגשוג של תאים, מעין הנָּצָה. ילד לעולם איננו אלא הינֵן של הוריו. התא הוא המבטיח את רציפות החיים.

אם כן, כל אורגניזם מקורו ביחידה הנלקחת מהדור הקודם. יחידה זו מתחלקת על־ידי התפלגות, והתאים הנוצרים בדרך זו מתמיינים כדי לבצע תיפקודים שונים, מתחברים זה לזה ברקמות ובאיברים, גותנים צורה למבנים שמהם מופיעה בהדרגה הארכיטקטורה של בעל־החיים או הצמח. כל אורגניזם הוא שבט (clone), אגודה של תאים מטיפוסים שונים, אך מוצא כולם הוא בתא המקורי, הביצית.

חיים היו מעתה צירופים של יסודות וצברים של יחידות במקום מירקמים הטוויים בצפיפות ושכבות הערוכות זו על גבי זו. עם הופעתה של תיאוריית התא, ניתן לביולוגיה מסד חדש, שהרי אחדות עולם־החי כבר לא התבססה על המהות של היצורים, אלא על החומרים, ההרכב וההתרבות שלהם, שהיו משותפים לכולם. האיכות המיוחדת של החי שיקפה את ארגונו הפנימי. אולם בזמן קירבה תיאוריית התא את עולם־החי אל עולם־הדומם, מאחר ששניהם נבנו על־פי אותו עיקרון: רבגוניות ומורכבות הנוצרות על־ידי צירופים של רכיבים פשוטים. התא נעשה 'מרכז של גדילה', כשם שהאטום ייצג 'מרכז של כוח'.

והשינוי האחרון היה במרחב המחבר דורות רצופים, שהרי עתה כבר לא זינק הארגון, מוכן ומזומן, מן הזרע, אלא התפתח בהדרגה מתא יחיד המופרד מגופם של מולידיו. במשך ההתפתחות העוברית, הגדילה של הביצית מחוללת מעקובת של ארגונים שונים, שרק האחרון מביניהם תואם לבוגר. את ההתרבות כבר לא ביססו על התמד של מבנים שנקבעו פעם אחת בשביל הכול, אלא על מחזורים של ארגונים הבאים זה אחר זה, הקושרים את הביצה לתרנגולת ממש כפי שהם קושרים את התרנגולת לביצה.

את המרחב, שהשתנה באופן זה, צריך היה להפגיש עם זמן. שהרי, משעה שמדובר בארגון של יסודות מסוימים ולא רק בסתם התאגדות שלהם, אי־אפשר עוד להציג את סוגיית מוצאם בעזרת המונחים הנושנים של המאה ה-16. ארגונים לא חוברו זה לזה בגלל קירבתם זה לזה במרחב, וגם לא בגלל האנלוגיה בין יסודותיהם. הם חוברו זה לזה על־ידי רצף בזמן, אשר לפיו נקבעו היחסים בין היסודות האלה. אם הבחינו באנלוגיה בין שתי מערכות מאורגנות, היה זה משום ששתיהן עברו דרך שלב משותף בסדרה של רצפים. רעיון הארגון היה קשור ללא הפרד עם זה של ההיסטוריה שלו. אולם ההיסטוריה של מערכת מאורגנת איננה רק סדרה של אירועים, שהמערכת היתה מעורבת בהם. היא היתה לסדרה של טרנספורמציות שיצרו בהדרגה את המערכת. וכך כבר לא היה צריך להבטיח את תמידותה של המבנה הראשוני מדור אחד לבא אחריו, שהרי אותם ארגונים יכולים היו להיגזר זה מזה לפי אותם שינויים

המתרחשים בפרמטר אחר. מאז, כל המאמצים, כושר ההמצאה של הביולוגים והתהליכים שנקטו הופנו למציאת דרכים לבודד משתנה אחד, להמציא שיטה לשנותו בדרך שנקבעה מראש, ולמדוד כיצד זה משפיע על המשתנים האחרים. מכאן ואילך היו רק 'בעיות שלושה גופים' בביולוגיה.

עם הבהרת הקשר בין מבנה, תיפקוד וסביבה, אופן סידורם של יצורים במרחב השתנה לגמרי. השינוי הראשון קשור במרחב שתופס עולם-החי בשלמותו: במונחים אורגניים, לא כל צירופי היסודות היו אפשריים עוד, רק הסידורים הממלאים אחר תנאי הקיום יכולים להיות; רק אלה המסתגלים לסביבה יכולים להתרבות. שרשרת האורגניזמים הרציפה מקצה עולם-החי ועד קצהו הוחלפה בכמה טיפוסי ארגון עיקריים, כמה מסות המבודדות זו מזו. הרציפות של החי כבר איננה אופקית בקרב היצורים, אלא אנכית ברצף של דורות הקשורים עלידי התרבות.

שנית, חל שינוי במרחב שתופס כל יצור חי בעצמו. במספר המצומצם של הצירופים האפשריים, האיברים אינם מחוברים זה לזה באקראי, אלא ערוכים על-פי תוכנית מדויקת. האיברים החיוניים קבורים במעמקי האורגניזם, החשובים פחות מצויים על שטח-הפנים שלו. כל מה שהוא חשוב, כל מה שנחשב לבסיס החיים ואי-אפשר לשנותו ללא תוצאות דרמטיות לקיומו של בעל-חיים, הורחק איפוא מן הסביבה והיה מוגן מכל ההשפעות החיצוניות. כל מה שהיה משוני נמצא במגע ישיר עם הסביבה ולפיכך כפוף לפעולתה. מאחר שהאיברים המשניים יכולים להשתנות, אם גם לא בחופשיות מלאה, הרי במידה מסוימת הם האתר שבו מתרחשות כל פעולות-הגומלין בין האורגניזם לסביבתו. בשטח-הפנים, באותה מעטפת שחצצה בין האורגניזם לסביבתו וגם איחדה אותו עמה, שם יכולה להיות לגורמים החיצוניים השפעה ישירה מתמשכת, פחות או יותר, על היצור החי.

שינוי התחולל גם במרחב שתפס החומר של היצורים החיים עצמם, שהרי הם היו מורכבים תמיד מתאים. את הרציפות של הסיב או הרקמה החליף עתה טבעם הבדיד של הסידורים התאיים. גופים

זמן

זמן מייצג לביולוג בימינו הרבה יותר מפרמטר פשוט של הפיסיקה. אין להפריד בין זמן ובין הראשית של עולם־החי ושל האבולוציה שלו. כל אורגניזם, אפילו הפשוט ביותר, הירוד ביותר, המצוי על כדור־הארץ, הוא האחרון בסדרה של יצורים, שלא נותקה במשך שני מיליארדי השנים האחרונות, או יותר. כל בעל־חיים, כל צמח וכל מיקרוב הם אך תוליה בשרשרת של צורות משתנות. כל יצור חי הוא בהכרח תוצאה של היסטוריה המייצגת לא רק את סדרת האירועים שאבותיו לקחו בהם חלק, אלא גם את רצף הטרנספורמציות שעיצבו את האורגניזם הזה בהדרגה. רעיון הזמן קשור ללא הפרד עם סוגיות מוצא, רציפות, אי־יציבות ואקראיות. זמן קשור למוצא, כי הופעת החיים נחשבת לאירוע שהתרחש אולי רק פעם אחת מאז היווצרות כדור־הארץ, מכל־מקום, לעתים נדירות ביותר: לפיכך, כל היצורים החיים הקיימים היום הם צאצאיו של אותו אב קדמון יחיד, או של צורות פרימיטיביות מעטות ביותר. זמן קשור לרציפות, כי מאז הופעת האורגניזם הראשון, החי אינו יכול להופיע אלא מהחי: משום שרק כתוצאה של התרבויות רצופות מאוכלס היום כדור־הארץ באורגניזמים מגוונים. זמן קשור לאי־יציבות, כי אף־על־פי שהרביה היא מנגנון מדויק, שכמעט תמיד יוצר את הזהה, בכל זאת הוא יוצר, אמנם לעתים נדירות אבל זה קורה בוודאות, את השונה: די בשוליים צרים אלה של גמישות להבטיח את הווריאציות הדרושה לאבולוציה. ולבסוף, זמן קשור לאקראיות, כי אין לגלות בטבע שום כוונה, שום פעולה מתואמת

רצופים, כלומר, על-ידי אותה 'אבולוציה'. למעשה, היתה זיקה בין מרחב לזמן במהלך ההתפתחות העוברית. איברים לא נוצרו בסדר אקראי, כשם שגם לא פוזרו בתוך הפרט-היחיד באופן אקראי. האיברים החשובים ביותר הם אלה הנטועים עמוק ביותר בתוך הארגון, אלה שלא קל לחולל בהם שינויים ואף נוצרו הראשונים. לעומת זאת, איברים נלווים הם אלה שעל שטח-הפנים, ובהם חלו שינויים רבים והם שנוצרו האחרונים. תוכנית של היווצרות בזמן תאמה איפוא לתוכנית של ארגון במרחב. סדרת הטרונספורמציות שהיוותה את האונטוגנזה הצביעה איפוא על יחס חדש בין מינים בני אותה קבוצה. שכן בכל העוברים של הקבוצה הופיעו תחילה האיברים החשובים והחבויים, כאילו ליצור את אותו ארגון בסיסי. רק מאוחר יותר החלו העוברים של הקבוצה פונים לכיוונים שונים; כאילו המינים השונים שהחלו לצעוד יחד לאורך אותו נתיב עצרו בנקודות שונות: המושלמים ביותר הוסיפו ללכת באותו נתיב כדי להשלים את פרטי שטח-הפנים שלהם. מעבר לזמן של האונטוגנזה ניתן להבחין במעורפל בזמן מרוחק, בעל עוצמה רבה יותר, המרמז על רשת של יחסים בין היצורים החיים. עתה היתה אפשרית תיאוריה של אבולוציה.

הדורות של עולם־החי עדיין ייצג סדרה משעממת של תוצרים זהים ותו לא, קו ללא עליות וללא מורדות. לעומת זאת, ההיסטוריה של כדור־הארץ נראתה כשורה של אסונות, מפל של תמורות שאירעו במשך תקופות ארוכות. היסטוריה זו כבר לא עלתה בקנה אחד עם הכתוב בתנ"ך, כלומר, שמאז הבריאה הופרע השקט על־פני כדור־הארץ אך ורק על־ידי המבול. הכרונולוגיה של הדורות סימנה את הזמן של היצורים החיים, היא היתה כביכול הזמן הפנימי שלהם. ולעומת זאת, הזמן שאכפו שואותיו של כדור־הארץ על עולם־החי עדיין נשאר עניין שמחוץ ליצורים עצמם; הם הושפעו רק באופן עקיף, רק במידה שהתהפכות שאירעו על־פני כדור־הארץ שיבשו את בתי־הגידול שלהם, את האקלים שחיו בו ואת מזונם. התוצא העיקרי של שואות אלה היה התקררות הדרגתית של שטח־הפנים של כדור־הארץ, שתחילה היה לזהט. קליפת כדור־הארץ, שכוסתה במעין אוקיינוס, התקפלה והתקמטה; יבשות הופיעו והרים התנשאו אל על. וכאשר שטחי קרקע מסוימים שקעו, פרצו פנימה מים והופיעו ימים חדשים. וכך השתנו גם האקלימים: תחילה היה תמים בכל מקום, אחר־כך היה קר באזורים מסוימים וממוזג באחרים. לכל האירועים הללו היו השלכות על עולם־החי, בכך ששינו לא את היצורים עצמם, אלא את תפוצתם על־פני כדור־הארץ. העקבות שהשאירו מאובנים מעידים על הזהות ביניהם לבין האורגניזמים בני־הזמן. 'באזורים שבפנים היבשת, אמר בופון,

בפסגות הרים ובמקומות רחוקים ביותר מהים מוצאים קונכיות, שלדים של דגיים, צמחיים וכו', הדומים למעשה לגמרי לקונכיות, לדגים ולצמחים המצויים היום בים... אין שום ספק בדבר הדמיון המושלם שביניהם ובוהותם של המינים האלה.¹

מאחר שהתפזרו בגלל התקררות כדור־הארץ, המינים ששיגשגו בעבר באקלימים חמים, גאלצו לברוח ולהתקבץ באיזור היחידי שנשאר חמים בימינו. האזורים שהתקררו אוכלסו בהדרגה על־ידי אורגניזמים שאינם ידועים במקומות אחרים. בתהליך זה נכחדו מינים רבים. בסיכומו של דבר, בגלל גבנויותו של קרום כדור־הארץ, האקלימים השונים, ופיזור האוקיינוסים והיבשות,

של הסביבה על התורשה, העשויה לכוון את הווריאציות לנתיבים שנקבעו מראש: אין איפוא כל כורח אפרירורי לקיומו של עולם־החי, כפי שהוא בימינו. כל אורגניזם, יהיה אשר יהיה, מחובר איפוא ללא הפרד לא רק למרחב הסובב אותו, אלא גם לזמן אשר הובילו עד כאן ואשר נותן לו מעין מימד רביעי.

למדע בן־הזמן, מצבו של עולם־החי בהווה מוסבר על־ידי האבולוציה. אולם התפקיד המיוחס לעבר מותנה בהכרח על־ידי האופן שבוחנים את ההווה ומפרשים אותו. המשקל והפעולה שתקופה נתונה מייחסת לזמן נקבעים למעשה על־ידי ייצוגם של הדברים ושל היצורים בעיניה, על היחסים שהיא קובעת ביניהם ועל המרחב שהיא מציבה אותם בו. לא נפריו אם נאמר, שעד המאה ה-18 לא היתה ליצורים החיים כל היסטוריה. הגרציה של יצור היתה תמיד בריאה: מעשה בודד, הדורש התערבות מיידית של כוח עליון כלשהו; או מעשה ראשוני, המתבצע בסדרה בעת ובעונה אחת לכל היצורים שנועדו להופיע אי־פעם. גם לאחר שהוגדר המין בדייקנות רבה יותר, הוא נתפש כעין מסגרת קבועה שהפרטים־היחידים משובצים בה בזה אחר זה. במהלך דורות רצופים, אותן צורות נמצאות תמיד באותם מקומות. התמונה נשארה קפואה, זהה תמיד לעצמה. איוו היסטוריה יכולה להיות ליצור שנוצר־מוקדם, הממתין בחלצי רצף של הורים לשעה שיראה אור יום?

שזאות

רק במשך המאה ה-18 נכנס רעיון הזמן לעולם־החי. ראשית, משום שרעיון ההתרבות נתן ליצורים עבר: אותה שרשרת ההולכת ומתמשכת לאתור דרך הורים והורי־הורים, אותה צאצאות מונוטונית שבזכותה הולך המין ומתמיד. שנית, ובעיקר, משום שעל־פי כתביהם של בארנט, וודוורד, פְּנוֹאֶה דה־מאיה, ומעל לכול כתביו של בופון, מתברר לנו שסדרה של שואות חוללו תמורות בעולם שהיצורים חיו בו. מאז הבריאה לא היה כדור־הארץ יציב: לפתע רכש היסטוריה; יש לו גיל, יש לו תקופות. במאה ה-18, רצף

לבסוף, אפילו ליניאוס עצמו החל מתלהב מהופעת צמחים פורחים מסוימים, שלא היו ידועים עד אז, וצפה אפשרות של 'טרנסמוטציה' של מינים בגלל הכלאה כלשהי שלא באמצעות הטבע.

בכל זאת, לא די ברעיון הטרנספורמציה בלבד להגדרת הטרנספורמיזם. מה שמאפיין טרנספורמיזם הריהו הדחף הנובע מהיצורים עצמם, המוביל אותם בהדרגה מהפשוט למורכב במהלך התמורות שהתרחשו על פני כדור־הארץ; זוהי תוצאה של שיווי־משקל, שהוא תמיד בלתי־יציב, בין הצורות החיות; זהו המשחק של פעולות־הגומלין בין האורגניזמים לסביבתם; זוהי הדיאלקטיקה בין הדומה לשונה בהיסטוריה האחדותית של הטבע. בקיצור, הטרנספורמיזם הוא תיאוריה סיבתית על הופעת המינים, גיוונם והקירבה המשפחתית ביניהם. ובמובן מקיף־כול זה, אין מוצאים תיאוריה זו בכתביהם של חוקרי המאה ה-18. אצלם, הזמן של היצורים והזמן של כדור־הארץ, הזמן הביולוגי והזמן הארצי, נשארים בלתי־מקושרים. רק לעתים רחוקות הם נפגשים ופועלים זה על זה. במחשבת המאה ה-18 מוצאים רק כמה חוטי מחשבה פזורים, העתידים להתאחד במאה הבאה לרעיון בדבר שרשרת סיבתית של אירועים ביולוגיים.

בכמה כתבים מוצגת האפשרות בדבר שינוי כה גדול בקרב היצורים החיים, שבאמצעותו מין אחד הופך למין אחר. הטרנספורמציה של 'דגים לציפורים', למשל, נדונה באריכות על־ידי בני־יה דה־מאיה; וידועה לכול החשיבות שמייחסת כל תיאוריה אבולוציונית. למעבר מחיים בים לחיים ביבשה. דגים שהושארו מאחור בגלל מים שהלכו ונסוגו, אמר דה־מאיה, 'נאלצו להתרגל לחיות ביבשה'.⁴ סנפירי הבטן הקטנים, ששימשו את הדגים לשחיה בים, עתידים היו להתפתח לגפיים שישמשו להליכה על היבשה. החרטום והצוואר עתידים היו להתארך. זיפים שצצו על הגוף עתידים היו ליהפך בהדרגה לפלומה ואחר־כך לנוצות. היה קל מאוד לדמיון כיצד דג מכונף, שעף בדרך־כלל מתחת לפני המים ולפעמים באוויר, משתנה לציפור העפה תמיד באוויר אך שומרת על הצורה, על הצבע ועל תנועת הגלישה של הדג.

השתמרו הצורות החיות, המצויות כיום על־פני כדור־הארץ. ללא הרבגוניות הגיאוגרפית הזאת לא היתה על־פני כדור־הארץ הצמחיה הירוקה העשירה שאנו עדים לה בשדות וביערות. 'ים קודר היה מקיף את כל היבשות, 'אמר בופון, 'ומכדור־הארץ ומסגולותיו היה נשאר רק כוכב־לכת אפל ונטוש, שבמקרה הטוב ראוי היה לשמש משכן לדגים.²

מעולם לפני־כן לא הוטל ספק באי־מוביליות של עולם־החי ובנוקשותו. אף לא היה אפשר להעלות בדמיון שהתמונה המיוצגת על־ידי סדרות הצורות החיות היתה שונה אי־פעם מכפי שהיא בהווה. אך משעה שהתברר כי לכדור־הארץ יש היסטוריה קצת סוערת, הורגש מעין רעד מתחת לעולם־החי. הִפֵּן שעולם זה ניצב עליו החל לנוע. לפתע נראה היה שאולי, אחרי ככלות הכול, היצורים המאורגנים לא תמיד היו בהכרח בלתי־משתנים, שהמינים יכולים אולי להשתנות במרוצת הזמן, וביצורים עשויים להתרחש תמורות. מקורה של המחשבה הטרנספורמיסטית מיוחס בדרך־כלל למאה ה-18. מול רעיונותיו של ליניאוס בדבר קביעות המינים, מציגים את הגישה האבולוציוניסטית, שלא רק בופון ומופרטואי נקטו אותה, אלא גם בנואה דה־מאיה, דה־רובינה, שארל בונה ודידרו. טוענים שגישה זו הלכה והתפשטה במחצית השניה של המאה ה-18, ולמאה הבאה לא נשאר אלא להגדירה ולהשתמש בה. אולם יש להבהיר מה משמעות המלים 'טרנספורמיזם' ו'אבולוציה'. ההשקפה החדשה אמנם התחילה מתגלה ברוב כתביהם של החוקרים באמצע המאה ה-18, כלומר, יש מעבר בין צורה חיה אחת לצורה חיה אחרת; מינים רבים שחיו בעבר, ונעלמו, ולעתים קרובות השאירו אך ורק עקבות שקשה לזהותם או לפענחם. מעתה כבר לא קבע איש, שבעלי־החיים והצמחים בני־הזמן היו יציבים בכל הזמנים, ויישאר כפי שהם לנצח. אין ספק שהיתה אי־זדאות בדבר עברם ועתידם של היצורים, ואת ההשקפה הזאת ביטא דידרו:

הזחל הזעיר, המתפתל בבוק, נמצא אולי בדרכו להפוך לבעל־חיים גדול; בעל־החיים הענקי, המפחיד אותנו במידותיו, נמצא אולי בדרכו להפוך לזחל, הוא אולי רק תוצר מיוחד ובן־חלוף של כוכב־הלכת הזה.³

ביותר, האב־טיפוס, עד למורכב ביותר, האדם. השרשרת איננה נוצרת איפוא על־ידי הדחיפה קדימה ועל־ידי המעבר של הצורות, של צורה אחת לצורה אחרת, אלא זוהי מעין מערכת־מצורפת, היוצרת אורגניזם אחד ביום מסוים, ואורגניזם שונה לגמרי ביום הבא. לעומת זאת, לדעת שארל בונה, כל היצורים החיים עושים את דרכם באופן סדיר לעֵבֶר מצב עתידי, שבו 'יהיו שונים ממה שהם כיום, כשם שמצבו של כדור־הארץ שלנו בעתיד יהיה שונה ממצבו בהווה'.⁸ גם כאן אין מדובר בתמורות רצופות, המובילות במשך הזמן מהפשוט אל המורכב, אלא בתזוזה כללית של היצורים החיים, העתקה של כל עולם־החי לאורך ציר־הזמן. כל מין, בעודו שומר על מקומו בשרשרת, יכול באופן זה לתפוס מקום חדש בהתאם לדרגת שכלולו.

אראז האדם, שיועבר למקום אחר, המתאים יותר לרמתם של הכשרים שלו, יניח לקוף ולפיל את המקום הראשון־במעלה, שיש לו עצמו עתה בקרב בעלי־החיים בכוכב־הלכת שלנו... ומעמדם של המינים הירודים ביותר כמו צדפות, פוליפים, וכו', לעומת זה של המינים העילאיים יותר בהירארכיה החדשה, יהיה כמעמדם של הציפורים והולכי־על־ארבע לעומת זה של האדם בהירארכיה הנוכחית.⁹

אם זוכרים ששארל בונה היה חסיד מושבע של היווצרות־מוקדמת, ברור שהעליה של היצורים בסולם ההתפתחות צריכה היתה להיות מתוכננת מאז הבריאה, על־ידי שיפור מכוון של הנבטים המקננים זה בתוך זה.

יש איפוא משום שרירות בהצבת כתבים מעין אלה בצד הכתבים של בופון או של מופרטואי. אפילו בכתבי מופרטואי יש רק יסודות ספורים של וריאציות, מעולם לא תיאוריה מקיפה, המציעה היווצרות הולכת ומתקדמת של המינים. בופון הוא שהדגיש בצורה הבהירה ביותר את חשיבותם של תנאי חיים, אקלים ותזונה, בקביעת האופן שהתאימו היצורים החיים את עצמם כדי שיוכלו לחיות בתקופות הגיאולוגיות. לדעת בופון, האורגניזמים אינם יכולים להיות בלתי־לויים בסובב אותם. הגורמים החיצוניים פועלים בשתי דרכים. ראשית, הם מגבילים את פוריות

הזרע של אותם דגים, שנישא אל הביצות, גם עשוי היה לגרום לטרנסמוטציה הראשונה הזאת של המין, מזה החי בים לזה החי ביבשה. גם אם מאה מיליוני יצורים נכחדו מבלי שיוכלו לרכוש את ההרגל הזה, די היה ששניים יצליחו בכך, כדי שיופיע המין.⁵

לדברים אלה יש צליל מוכר למדי לאוזני אנשי המאה ה-20, לאחר התניה של למעלה ממאה שנות מחשבה אבולוציונית. אולם בראש ובראשונה ביקש דה־מאיה לבסס, בהנחה שבזמנים קדומים כיסה אוקיינוס את פני כל כדור־הארץ, שהיתה זיקה בין הסדרה הרציפה של האורגניזמים החיים כיום במים ובין אלה החיים ביבשה. להראות שלכל בעל־חיים החי ביבשה יש בעל־חיים דומה החי במים. שיש התאמה לא רק בין הציפור לדג המעופף. אלא ש'האריה, הסוס, השור, החזיר, הזאב, הגמל, החתול, הכלב, העז והכבש – לכולם יש בים בעל־חיים הדומים להם'.⁶ כל אחד מבעל־החיים האלה, המצויים במים, יכול לצאת ליבשה ולהתיישב שם בכל עת. זהו טיפוס הטרנספורמציה היחיד שנדון בספרו של דה־מאיה *Telliamed*. אין שום רצף של וריאציות, שום קשר בזמן, שום מורכבות הולכת וגדלה של האורגניזמים, שום שכלול, ככל שכדור־הארץ הולך ומזדקן.

לעומת זאת, בכתבים אחרים, כמו אלה של שארל בונה או של רובינא, מוצאים נטיה לראות בעולם־החי מורכבות הולכת וגדלה, 'התקדמות' ממצב פשוט למדי למצב אחר, מורכב יותר. למשל, רובינה סבר, שיש רק 'יצור אחד ויחיד, אב־טיפוס של כל היצורים'.⁷ גם אמירה זו עשויה להשרות עלינו אווירה טרנספורמיסטית מסוימת. אולם האב־טיפוס היה למעשה רק מעין יחידה חיה, מולקולה אורגנית המשמשת להיווצרות היצורים החיים. לדעת רובינה, תוכנית יחידה של ארגון או של 'אנימליות' אפשרית ממש בהתחלה: זוהי התוכנית שהתממשה באב־טיפוס. לזה האחרון יש נטיה טבעית להתפתח ולצרף צירופים, כדי ליצור בהדרגה את סוגי היצורים המגוונים ביותר. הצירופים והווריאציות של האב־טיפוס הם היוצרים את מגוון הצורות החיות, וכך נארגת רשת רציפה של יצורים. בסופו של דבר, כל הצירופים האפשריים מתממשים ומהווים את החוליות בשרשרת המתמשכת מהפשוט

שהלכו לשם בעצמם.¹¹ מאחר שאותם תוצאים נגרמים על-ידי אותן סיבות בתנאים דומים, המולקולות האורגניות מסתדרות במערכים דומים ליצירת צורות דומות. ובכל זאת, כשמולקולות אורגניות מצטרפות זו לזו ליצירת בעלי-חיים או צמחים, אין זה כדי ליצור יצורים ירודים, אלא להיפך, כדי ליצור אורגניזמים מורכבים, שכבר דומים לאלה המוכרים כיום. כל הצירופים האפשריים מתממשים בהדרגה. רובם מוצלחים והולכים וממלאים את כל המרחבים האפשריים, כל פינה על האדמה, כל מקווה מים: באותה עת הם יוצרים בהדרגה רשת רציפה של יצורים היכולים לחיות על-פני כדור-הארץ באותו זמן. לעומת זאת, צירופים אחרים נכשלו. הם יצרו את 'אותן מפלצות פגומות, אותם רישומים בלתי-מוצלחים שתוכננו אלף פעם, מומשו על-ידי הטבע, ובקושי היה בהם הכוח לשרוד אפילו פרק-זמן מוגבל'.¹² לפיכך, אנומליות פגומות אלה נעלמו מבלי להשאיר אחריהן צאצאים, טואטאו בדומה למפלצותיו של דידרו ב'טיהור הכללי של היקום'.¹³ אף-על-פי שהטבע מנסה לממש את כל האפשרויות של המערכת-המצורפת, צורות ואיברים, צירופים מסוימים אינם בני-קיום. 'כל מה שיכול להיות, הווה, אמר בפועל, אך לא כל דבר יכול להיות. המאובנים מעידים על עברו של כדור-הארץ; המפלצות על גבול האפשרי בטבע. זמן הוא איפוא הפועל הגדול, רב-המשרתים של הטבע. אולם זמן כשהוא לעצמו 'מתייחס רק לפרטים-יחידים'.¹⁴ ייתכנו וריאציות המתוללות אי-אלו שינויים במין. ייתכנו מינים מסוימים, כמו הסוס, הזברה והחמור, הגמנים באופן ברור עם 'אותה משפחה' בעלת 'גזע מרכזי', שממנו מסתעפים כמדומה 'ענפים מקבילים'.¹⁵ תיתכן אפילו מעין קירבה משפחתית בין כל הצורות הנושמות, 'ארגון בסיסי' משותף, למשל, בין אדם לסוס. אולם, אחרי ככלות הכול, וריאציות אלו נשארות תמיד מוגבלות; כמו היקום עצמו, טיפוסים מסוימים אינם ניתנים לשינוי, אחרת לא היה המדע אפשרי. מסד זה של יציבות מובטח על-ידי קביעותן של התבניות הפנימיות. 'החותם של כל מין הוא טיפוס אשר מאפייניו הקבועים נחרטים בתכונות אופייניות בלתי-מחיקות ותמידיות לנצח'.¹⁶ אם לוקחים בחשבון את השינויים שהתרחשו על-פני כדור-הארץ, אם קובעים את מוצאם של בעלי-החיים בעידן שהיבשות עדיין לא התרחקו זו מזו, ואם מודים שבעלי-חיים מסוימים השתנו והיו למינים חדשים בעולם

האורגניזמים. יש יציבות מסוימת בעולם־החי, אך היא תוצאה של שני כוחות מנוגדים. 'מהלך האירועים הרגיל בטבע החי,' אמר בופון,

הוא באופן כללי תמיד קבוע, תמיד אותו הדבר; תנועתו, שהיא תמיד סדירה, נעה סביב שתי נקודות איתנות: האחת, הפוריות הבלתי־מוגבלת, הנתונה לכל המינים; האחרת, המכשולים הרבים לאין ספור, המגבילים את הפוריות הזאת לדרגה קבועה, שתמיד משאירה בערך את אותו מספר הפרטים־היחידים מכל מין ומין.¹⁰

בדברים אלה יש שמץ של דארוויניזם. הם כבר כוללים את התפישה בדבר ההגבלות המוטלות על התפשטות היצורים החיים, רעיון שאומץ על־ידי מאלתוס, ומאוחר יותר על־ידי דארווין וגם ואלאס. אולם אצל בופון זוהי שאלה של איזון ולא דווקא שאלה של תחרות. שיווי־המשקל נדון בהקשר להרמוניה, החייבת לשרוד בטבע, ולא בהקשר למאבקים ולסחיפות של האוכלוסיות. פוריות היא אמנם איכות הטבעה ביצורים החיים, אך אין היא פועלת כדי לגוון אוכלוסיות, אלא להנציח טיפוסים. הדבר החשוב הוא לקיים כל מין ברמה קבועה. שנית, לדעת בופון, הגורמים החיצוניים שיחקו תפקיד נוסף בעיצוב מבנהו של עולם־החי בן־הזמן. אם התחוללו שינויים, הם נגרמו לא על־ידי האורגניזמים עצמם, אלא על־ידי התוצאים של תנאי החיים, העוויתות של כדור־הארץ, והשואות השונות שהשמידו לגמרי צורות חיים מסוימות. הגורמים החיצוניים אינם פועלים ישירות על היצורים כדי לשנותם. אין הם פועלים על שיווי־המשקל של אוכלוסיות כדי להובילן לאורך נתיבים מסוימים. הם רק מרשים לצורות מסוימות לחיות, ולאחרות לא. אין בוחנים את מבנה עולם־החי לפי אוכלוסיות, אלא לפי טיפוסים. מינים רבים שהשתנו 'בגלל התהפוכות הגדולות שהתרחשו על־פני האדמה ובמים, בגלל שזנחו או טופחו על־ידי הטבע, ובגלל ההשפעה הממושכת של האקלים, שהיה עוין או תומך – אינם דומים למה שהיו בזמנים קדומים'. להיפך, בכל המקומות ששוררת בהם אותה טמפרטורה, לא רק מופיעים אותם מינים של צמחים, חרקים וזוחלים, 'מבלי שהובאו לשם', אלא גם אותם מינים של דגים, של הולכי־על־ארבע ושל ציפורים, 'מבלי

שעטלפים ואוחים הם בהשוואה לציפורים'. מרגע שהופיעו, חידושים מעין אלה חוזרים ונשנים במשפחות, אם כי לעתים הם מדלגים על כמה דורות. המינים הדומים פחות מכול

חבים כנראה את מוצאם הראשון אך ורק למספר קטן של 'הפקות' מקריות, שבמהלכן לא שמרו חלקי היסוד על אותו הסדר שהיה אצל ההורים; ובכל דרגת שגיאה נוצר כנראה מין חדש; ובאמצעות הסתעפויות חוזרות ונשנות נוצרה כנראה הרבגוניות האינסופית של בעלי־חיים שאנחנו רואים בימינו.¹⁸

אולם יש גם דרך אחרת להופעת וריאציות: על־ידי זיווג של פרטים־יחידים בעלי צורות שונות, שהרי מאפיינים של שני ההורים מופיעים בצאצא. אלה הפועלים כדי לספק את טעמם של הסקרנים הם כביכול בוראיהם של מינים חדשים. כך הופיעו גזעים של כלבים, יונים וקנריות, שמעולם לא נראו לפני־כן בטבע. 'תחילה הם רק פרטים־יחידים מקריים; אמנות והכלאה חוזרת ונשנית הפכו אותם למינים'.¹⁹ כדי למלא אחר דרישותיהן של אופנות־של־הרגע, ממציאים מדי שנה מינים חדשים של צמחים ובעלי־חיים, משפרים את צורתם ומגוונים את צבעיהם. לדעת מופרטואי, בדיוק כמו לדעת דארווין כעבור מאה שנה, מה שהמכליא מצליח להשיג באמנותו היהו מודל המאפשר לתפוש כיצד הטבע יוצר מינים חדשים באופן ספונטני. באדם, למשל, זיווג מקרי מביא להופעת גזעים חולניים או נאים, ענקיים או בעלי־מום, צאצאים יפים או פזולים. המשיכה או הדחיה שאנשים חשים לזולתם קובעים אם יהיו להם צאצאים או לא, ועל־ידי כך את השתמרותם או היעלמותם של מאפייניהם המיוחדים במינם. הטיפוס השחפני מסולק במהירות. לעומת זאת, רגליים חטובות הולכות ומשתפרות מדור לדור. פרידריך וילהלם העדיף חיילים חזקים וגבוהי־קומה, ועובדה זו הצליחה להגדיל את גובהם של נתיניו. על־ידי חיקוים של אלה העוסקים בהכלאה, יכולים היינו איפוא ליצור טיפוסים חדשים של בני־אדם. 'אם כן, מדוע אצל אותם סולטונים שבעי־מין, שכלאו בהרמונם נשים מכל המינים הידועים, לא נוצרו מינים חדשים?²⁰

החדש – בקיצור, על-ידי הערכה סבירה – ניתן לצמצם את מאתיים המינים של הולכי-על-ארבע לשלושים-ושמונה משפחות שנובראו בימי בראשית.¹⁷ ולפיכך, פשרה בין בריאה לווריאציות היא האחראית לראשיתו של עולם-החי בן-הזמן.

עמדתו של בופון אמנם נראית חדשנית, אך בכל זאת רב המרחק בינה לבין תיאוריה טרנספורמיסטית אמיתית. עמדה זו לא הציעה ליצור את המורכב מהפשוט. לא היתה בה שום התקדמות של צורות בזמן. לפיה, כשהתרחש שינוי במין, הוא לא השיג דבר. משמעה של וריאציות היה 'ניוון', 'דֶגְנֶטוּרַצְיָה' שבעטיה הסתעפו לבסוף אורגניזמים מהטיפוס המקורי ואיבדו את טוהר גזעם. אפילו השפעתה של הגיאוגרפיה על היצורים עדיין היתה רחוקה מאוד ממה שהפך ברבות השנים לפעולת-הגומלין בין האורגניזם לסביבתו. למעשה, בעמדה זו עדיין לא הוקצה שום מקום לסביבה, כפי שהבינו אותה במאה הבאה, שום מרחב מוגדר המקיף את האורגניזם, שאליו הוא מתפשט וכך מתרחב בעצמו, סביבה הפועלת עליו כשם שהוא פועל עליה. על-פני כדור-הארץ היו רק אזורים שהיו נוחים יותר לקיומן של צורות מסוימות; תנאי קיום שלא יכלו לקיים את כל טיפוסי האורגניזמים; 'נסיבות' שעיצבו את היצורים, בערך באותה דרך שהוקמו מוסדות, לדעת מונטסקיה.

מופרטואי, לעומת זאת, התעניין בעיקר במכניקה של הווריאציות. בכתביו מתגלה לראשונה הרעיון בדבר השינויים הפנימיים המועברים על-ידי התורשה ומביאים בעקבותיהם וריאציות בעולם-החי. שינויים אלה מתרחשים בעת משחק-הגומלין בין היסודות המבטיחים את רציפות המינים על-ידי רבייה. מקור השינויים התורשתיים טמון בחלקיקים המתאחדים בכל דור ליצור את הילד בדמות הוריו. בתוך המערכת הזאת יכולים להיווצר שינויים בשני אופנים, המובחנים היטב זה מזה. ראשית, עודף בחלקיקים או חסר בחלקיקים בעת יצירת חלק מסוים של העובר עלולים לגרום לשינוי באותו חלק. זה ההסבר לעודף אצבעות, או להופעת לבקנים, אותם כושים לבנים ששערותיהם דומות לצמר הלבן ביותר, שעניהם חלושות ואינן סובלות את אור היום ונפתחות רק בחשכת הלילה, ואשר הם 'בהשוואה לאנשים מה

אם רוצים לדייק, אין לדבר איפוא על טרנספורמיזם במחצית השנייה של המאה ה-18. באותה תקופה חשוב היה ליצור הרמוניה בין ייצוגו של עולם־החי, שעד אז נחשב לבלתי ניתן לשינוי, ובין התגליות בדבר הזעזועים שטילטלו את כדור־הארץ. למרות הפערים שגילו לנו המאובנים, למרות הנדידות הגדולות והשוואות שהפיצו את המינים על־פני כדור־הארץ כאילו היו הפיסת קלפים, היצורים החיים עדיין יצרו רשת רציפה: רציפה בגלל המשחק של זהויות והבדלים במרחב, ולא של צאצאות בזמן. עם מושג הרבייה הופיע קשר חדש בין היצורים, המחבר פרטים־יחידים באופן אנכי במהלך הדורות. אך בינתיים יושם קשר זה רק לאורגניזמים הנמנים עם אותו מין, או למינים כה קרובים זה לזה, עד שקווי־הדמיון הברורים שביניהם חייבו לקבצם ב'משפחות'. אמנם הוטל ספק ברעיון שצורות נשארות קבועות ונוקשות במהלך הדורות, אולם הגמישות שיוחסה לגופים החיים השפיעה רק על יסודות בעלי ערך משני, רק על תכונות אופייניות, שהיתה להן חשיבות בסיווג האורגניזמים, אך לא במבנים הכלליים שלהם: גובה, אורך אוזניים או גפיים, מספר אצבעות, צבע עיניים או שיער. בקווים החשובים של הארכיטקטורות שלהם, המינים שימרו את קביעותם. עדיין לא היה אפשר להעלות על הדעת שהתמונה המייצגת את עולם־החי היתה אי־פעם שונה לגמרי; עדיין לא היה אפשר להעלות על הדעת שתמונה זו השתנתה עם הזמן, חוץ מנגיעות מכחול פה ושם, תוספות קטנות כדי לכסות על כתמים לבנים ספורים שעל הבד, שינויים קלים בסידור הדמויות במרחב – בקיצור, פרטים מעטים ובלתי־חשובים. גם אם העולם בן־הזמן כבר לא יכול היה להיחשב לזהה לגמרי לעולם כפי שנוצר בעת הבריאה, בכל זאת ראשיתו הצריכה מעשה בריאה כביר. כדי שהצורות הרבגוניות בנות־הזמן תוכלנה להתפתח, צריך היה שהטיפוסים העיקריים – הנושאים העיקריים, שעליהם עתיד הטבע לבצע את הווריאציות – ייווצרו בראשיתו של העולם. ממש מההתחלה, בשעת האפס, כבר צריכים היו להיות מינים רבים דים ליצירת סולם רציף. הזמן יכול היה רק להגדיל את מספר השלבים בסולם ולצמצם את המרחק ביניהם. לא הועלתה כל הצעה שיש לסדר את הטרנספורמציות המתרחשות ביצורים החיים בסדרות כרונולוגיות. המיקצב שנתנו דורות רצופים, וציוני־הדרך המעידים על השואות שזיעזעו את

בעזרת שני המגנונים האלה המערכת המצורפת של הצורות הגראות ביצורים החיים מקבילה למערכת המצורפת של החלקיקים המשמשים לרביה בזרעים. אנומליות בהספקת חלקיקים או כשלים בהיווצרות העובר יוצרים יצורים חיים מכל סוג אפשרי שהוא. ובכל זאת, לדעת מופרטואי כמו לדעת בופון ודידרו, לא כל המימושים הם גם בגייקיום. מבין כל הצירופים המקריים שיצר הטבע, יכולים להתקיים רק אלה שבניהם שוררים 'קשרים מתאימים מסוימים'.²¹ המקריות מולידה פרטים יחידים רבים לאין ספור. רק אצל מעטים מבניהם ערוכים האיברים בדרך העונה על צורכי האורגניזם: אלה שרדו. אולם ברוב המקרים, איסדר בהרכבם מונע את התפתחותם: אלה נכחדו. 'בעלי-חיים ללא פה אינם יכולים לחיות, אלה החסרים איברי רביה אינם יכולים להנציח את עצמם: נשארו רק אלה שבהם הכול פועל בסדר וכשורה.'²² מבין שפע עצום של יצורים אפשריים, שהוא תוצאה של וריאציות מגוונות לאין ספור, הטבע הוא העורך את הבחירה, בסופו של דבר.

בדרכו האופיינית, מופרטואי לקח מערכת שהמבנה הנראה שלה מבוקר על-ידי מבנה מסדר גבוה יותר, והגזים בהצגתה. הוא רצה לבסס הן את היציבות של היצורים והן את ההשתנות שלהם על הרעיון שצורות שוחזרו בכל דור על-ידי הקבצה של חלקיקים. לאחר מכן צריך היה לגוון ולסדר חלקיקים אלה במספר אינסופי של צירופים, כדי ליצור את כל הסידורים, הטיפוסים והצורות המגוונות שאפשר להעלות על הדעת. אורגניזמים ללא כושר חיות נוצרו ממש כמו אורגניזמים בעלי כושר חיות, אך רק האחרונים השתמרו לאחר שעברו במסגרת של הטבע. גם אז מספר הצורות המגוונות שהונצחו היה גדול דיו כדי לאפשר את רציפותו של עולם-החי: אולם זמן שיחק תפקיד צנוע בלבד בפרשה זו. לא היה שום מעבר הולך ומתקדם מהפשוט אל המורכב. לא היה שום שכלול בשלבים קטנים. דבר לא העלה על הדעת סדרה של תמורות רצופות, שבאמצעותן נוצר בהדרגה העולם שחי עתה על כדור-הארץ. מופרטואי היה מעוניין להציג מערכת שהיא פנימית ליצורים החיים, המסוגלת ליצור, אך ורק בכוחן של היחידות המרכיבות אותם, את כל הצורות השונות שאפשר להעלות על הדעת ולנצל את כל סולם האפשרויות.

הקשרים בין רכיביו של יצור כבר לא היתה בהכרח בלתי־משתנה. אפשר היה לחולל בה תמורות בתהליך חד־כיווני למערכת אחרת, מורכבת בדרגה אחת. ואז יכלו להתייחס לכל היצורים החיים כנגזרים זה מזה, ולחברם זה לזה בתנועה משותפת בזמן, על־ידי מין דחף מבפנים, הגוטה להגדיל את מורכבות הגופים החיים. בכך שייחס לארגון יכולת להשתנות על־ידי תמורה, השיג לאמארוק מה שלא היה אפשר לעשות במאה ה-18 – כלומר, לחבר את כל היצורים בהיסטוריה אחת, המתארת את יצירתם דור אחר דור. לדעת בופון, התמורה איננה ישימה רק בתחומים מוגבלים מאוד ואיננה מתרחשת רק בתוך 'משפחות' של מינים. בראשיתו של עולם־החי היו כארבעים טיפוסים מובחנים זה מזה, אשר מהם הופיעו צורות חדשות שיצרו את עולם־החי המוכר לנו. אולם לא היה דבר כלשהו שיאחד את המשפחות האלה זו עם זו, שום קשר של צאצאות, שום סדר של קירבה משפחתית. המלה 'דנטורציה', שבה השתמש בופון כדי לתאר את הווריאציות של המינים, העבירה מסר של ניוון, של פגיעה בטוהרת המין. לעומת זאת אצל לאמארוק, התמורה יכולה היתה להתרחש רק במובן של הסתגלות, ובכך להגברת ה'כשרים'. טיפוסי הארגון השונים לא הופיעו איפוא בו־בזמן, אלא בסדר מסוים בזמן, 'שכן, בעת העליה בסולם בעלי־החיים, מבעלי־החיים הירודים ביותר ומעלה, הארגון נעשה מורכב ומסובך יותר באופן יוצא מגדר הרגיל'.²⁵ הזמן נעשה איפוא אחד הגורמים הפעילים העיקריים בעולם־החי. הזמן הוא שגרם לכל הצורות להופיע בהדרגה זו מזו. מעבר לרבגוניותם, כל היצורים הנמנים עם אותה ממלכה חוברו איפוא זה לזה על־ידי אחדותה של היסטוריה אחת. אולם, בכל זאת, היסטוריה זו יכולה היתה להיות מיוצגת רק על־ידי קו ישר אחד, ללא שברים וללא סטיות מן הדרך.

לדעת לאמארוק, שלושה גורמים פועלים יחד לתת לזמן את תפקידו היצירתי: רצף, משך ושכלול הארגון. ראשית, כל העדויות מצביעות, שכל הצורות החיות לא יכלו לקבל את צורתן באותו זמן. הגופים החיים התנסו בדרגות שינוי שונות במצב איבריהם וביחסים ביניהם. לכן אין המין יכול להיות מסגרת נוקשה ובלתי־משתנה, שנוצרה פעם אחת בשביל כולם, שלתוכה מתאימים עצמם הפרטים־היחידים בדורות רצופים. 'מה שקרוי מין... איננו אלא

כדור־הארץ, עדיין לא חוברו זה לזה, להסברת ההופעה ההדרגתית של רבגוניות האורגניזמים ושל מורכבותם. אם כי ליצורים החלה להסתמן היסטוריה משלהם, לעולם־החי עדיין לא היתה היסטוריה משלו.

טרנספורמציות

עם המעבר מהמאה ה-18 למאה ה-19 והופעת הביולוגיה אפשר היה להקצות לזמן תפקיד בהתהוות של כל היצורים, החיים בהווה. ראשית, משום שעם ההפרדה בין האורגני לאי־אורגני נוצרה קירבה משפחתית בין כל המושאים שנמנו עם קבוצת החי. שנית, משום שרציפות החי, הנולד רק מחי, השתחררה ממסגרת המינים הנוקשה. ולבסוף, משום שהקשרים בין היצורים כבר לא התבססו על חלקיהם הרכיביים או על איבריהם בנפרד, אלא על המבנה השלם שלהם, על התייחסות למערכת מסדר גבוה יותר, המיוצגת על־ידי הארגון. דרגת המורכבות של היצורים ורמת השלמות שלהם נמדדו לפי מה שכינה לאמארק בשם 'מסות עיקריות' של עולם־החי. לכל מסה היה ארגון משלה, 'מערכת קשרים' משלה בין המבנים, ההולכת ומתרופפת, צעד אחר צעד, מהיצורים המורכבים ביותר אל הפשוטים ביותר. האיברים הם אלה שהשתנו, אך לא באורח מקביל זה לזה ולא ביחס ישיר למורכבות האורגניזם. 'איבר נתון במין נתון', אמר לאמארק, 'מגיע לדרגת השלמות הגבוהה ביותר שלו; אולם איבר נתון אחר, שהוא עלוב מאוד ובלתי־מושלם במין זה עצמו, עשוי להגיע לדרגת שלמות גבוהה במין אחר.'²³ כל השוואה בין היצורים, כל סיווג שאינו מבוסס על ארגון הוא איפוא בהכרח שגוי ושרירותי. ולעומת זאת, על־ידי בחינת המסות, קל היה להבחין באותה שרשרת רציפה, באותו סולם מדורג הקיים בעולם־החי, שבקצהו האחד היצור הפשוט ביותר ובקצהו האחר היצור המורכב ביותר. 'במערך המסות קיימת סדרה יחודית ומדורגת לכל טיפוס של גוף חי, המתאימה להרכבו ההולך ומשתכלל של הארגון', אמר לאמארק.²⁴

וכן, הארגון בשלמותו נעשה מושא הטרנספורמציה. מערכת

נטיה גוברת לסיפוק צרכים, יכולת־תגובה רבה יותר לתביעות החיים. התמורות מובילות רק לצאצאים מוצלחים, לעולם לא לכשלונות בדמות 'מינים אבודים'. מאובנים רבים שהתגלו עד כה דומים לצורות בנות־הזמן. אם יש מאובנים כלשהם שאינם דומים לשום מין קיים, הרי זה משום שהאדם השמיד אותם, או משום שהשתנו לבלי הכר. אולם דבר איננו נעלם בעולם־החי. המינים העתיקים ביותר והחדשים ביותר מתקיימים זה בצד זה. הצורות הפשוטות ביותר והצורות המורכבות ביותר שנגזרו מהן מתקיימות ביחד. וכך יש בסיס משותף לשלושה מבין הפרמטרים שמבחינים בהן בעולם־החי: זמן הופעת האורגניזם, דרגת המורכבות שלו, ורמת השכלול שלו. ידיעת פרמטר אחד מאפשרת להקיש על שני האחרים, שכן הם מייצגים שלושה ביטויים של הסדר, שהטבע נקט אותו ביצירת ממלכת־החי וממלכת־הצומח.

אם כל הגופים החיים הם אמנם תוצרי הטבע, אין להכחיש שהטבע לא יכול היה לייצר אותם אלא ברצף, ולא את כולם ביחד בהרף־זמן אחד; אך אם יצר אותם הטבע ברצף, יש יסוד לדעה שתחילה יצר את הצורות הפשוטות ביותר ורק לבסוף את האורגניזם המורכבים ביותר.³⁰

מושלם פחות פירושו איפוא גם קדום יותר ומורכב פחות. זהו איפוא היחס המרשה להפוך את סדרת האורגניזם במרחב לסדרה איזומורפית של תמורות בזמן. סקירת שרשרת היצורים הרציפה, מהפשוט ביותר ועד המורכב ביותר, כמוה כמעקב אחר מצעד התקדמותו של הטבע בזמן, כשחזור של רצף התמורות שעלידיהן נוצרו היצורים החיים. בסולם היצורים, לצורות הפשוטות ביותר יש מקום מיוחד במינו, שהרי הן ראשיתו של הארגון. לפיכך, באורגניזמים הירודים ביותר, 'בעלי־חיים ללא עמוד שדרה', אצלם אפשר להבחין בווריאציות בצורה הברורה ביותר, וגם דרישות הארגון יכולות להיחקר אצלם בקלות רבה ביותר.³¹

בזמן פרסומו, ספרו של לאמארק *Philosophie zoologique* התקבל בקרירות. אם היתה ללאמארק השפעה כלשהי על בני־זמנו, לא היה זה משום שטען כי ראשיתו של עולם־החי אירעה ברצף תמורות של צורה אחת מצורה אחרת, אלא דווקא משום שגילה בחי אחדות

קבוע יחסי במצב נתון, שאיננו יכול להיות עתיק כמו הטבע'.²⁶ דבר זה ישים לא רק כשמדובר בענפים המתפצלים מכמה גזעים מקוריים, אלא בכל היצורים. מעתה כבר לא היה כל צורך בבריאה. 'כל הגופים המאורגנים הם תוצרים אמיתיים של הטבע, שיצר אותם ברצף, זה אחר זה'.²⁷ צעד אחר צעד הופיעו כל הצורות החיות באותה תנועה רציפה בזמן, בסדרה יחידה של תמורות רצופות. יש יחס הדדי בין שלב תמורה אחד ובין המרווח הנראה, המפריד בין שתי רמות ארגון סמוכות. אם ניתן היה לקבוע מהו היחס במרחב בין טיפוסי הארגון, אפשר היה להסיק ממנו על היחס בזמן בין התמורות: היחס הראשון נובע מהיחס האחרון.

סדרת התמורות התרחשה כנראה לאורך תקופות במשך זמן רב מאוד. כל מה שהיה על-פני כדור-הארץ שיגה בהדרגה את מצבו ואת צורתו. בכל הגופים שעל-פני האדמה מתחוללות 'מוטציות' מהירות, פחות או יותר,²⁸ בהתאם לטבעם ולכוחות הפועלים עליהם. היציבות שהאדם רואה בטבע היא רק על פני השטח, שהרי הוא בוחן את כל האירועים במונחים של משך החיים שלו עצמו. כמה אלפי שנים נראות בעיניו כתקופה ארוכה ביותר; למעשה, הן מאפשרות לו לראות רק מצבים נייחים, מרווחים בין שינויים המשפיעים על עולם-החי. ובכל זאת, גם אם שינויים ביצורים אינם נראים לעין, גם אם צורות הנראות היום במצרים אינן שונות מאלו שחיו שם לפני 3000 שנה, משך תהליך התמורה מפצה על איטיות התהליך. כדי שרבוגוניותו של עולם-החי תיווצר בתהליך איטי כזה, נדרש להקצות לו משך זמן ארוך.

בהשוואה למה שנראים בעינינו משכי-זמן ארוכים מאוד, לפי חישובינו הרגילים, אין ספק שצריך היה לחלוף זמן רב מאוד וצרכים היו להתרחש שינויים ניכרים בנסיבות, כדי שיוביל הטבע את ארגון בעלי-החיים לדרגת המורכבות וההתפתחות שאנו מוצאים בימנו.²⁹

לדעת לאמארק, הטרונספורמציה היא תהליך חד-כיווני. הווריאציות פועלת תמיד באותו כיוון, מהפשוט למורכב, מהיסודי למפורט, מהמושלם פחות מכול למושלם ביותר. כל שינוי המופיע ביצור ויוצר בעקבותיו עוד אחד, גורם בהכרח לצמיחת הארגון,

בגלל סיבה זו, פעולות הטבע מתפתחות בהתאם ל'תוכנית'. התוכנית מתאימה את היווצרותם של יצורים חדשים למצבו של העולם שהם צריכים לחיות בו. לפני שהוא יוצר יצור, הטבע כבר יודע מה הוא צריך ליצר. בקרב חולייתנים, למשל, ברור ש'הטבע החל להוציא את תוכניתו אל הפועל בדגים; לאחר מכן עשה צעד קדימה ויצר את הזוחלים; אחר־כך שיכלל עוד את תוכניתו ויצר את הציפורים, ולבסוף השלים אותה ויצר את היונקים המושלמים ביותר'.³² בהדרגה, צעד אחר צעד, ללא שגיאות או כשלונות, הטבע בורא, משכלל ומשנה את הצורות של הגופים החיים, כדי להשיג את יעדו: דרגת השלמות הגבוהה ביותר. שיפור המערכת דורש לעתים קרובות סדרה שלמה של שלבי ביניים. כדי למצוא את הפתרון הטוב ביותר לבעיית הנשימה, הטבע צריך היה לשכלל תחילה מערכת עם טְרַכְאֹת, אחרת עם זימים, לפני שיצר את המשופרת מכולם: את הריאה. אין שום ניסויים וטעויות, שום היסוסים או התחלות שגויות. יש אך ורק עיכובים וסיבוכים כל אימת שההתקדמות 'מסוכלת' על־ידי שינויים חיצוניים, על־ידי הנסיבות.

ליצירת תמורות עומד לרשות הטבע צירוף של שני גורמים: האחד טבוע בחי; האחר חיצוני לו. בכל יצור יש מעין כוח 'הנוטה ללא הרף ליצור ארגון מורכב יותר'. אין זה מנגנון הרביה עצמו, כפי שהיה מציג זאת מופרטואי, ולא דחף שאין לעמוד בפניו, הגורם להכפלה האקספוננציאלית של היצורים, כפי שבנג'מין פרנקלין ומאלתוס מזכירים אותו. זהו כוח שמקורו מיסתורי במידת־מה, 'כוח', אשר למרות טענותיו של לאמארק שמדובר בכוח מטריאלי, הוא דומה לכוח הוויטלי: הוא נחלתם הבלעדית של יצורים מאורגנים; הוא המקור האמיתי של ההרמוניה והסדירות בהתקדמותם של היצורים החיים. אך אף־על־פי שכוח זה מגדיל התארגנות בהתמדה, לא די רק בו עצמו ליצור את הרבוגניות המצויה בקרב האורגניזמים. ברור, למשל, שאם דגים 'חיו תמיד באותו אקלים, באותו סוג מים ובאותו עומק, אזי אין ספק שארגונם של בעלי־חיים אלה יראה הדרגתיות סדירה'.³³ אולם שוב, יתכן שלעולם לא היו יוצאים מהמים לאכלס את היבשות! כדי שתיווצרנה צורות חיים רבוגניות, צריכים ליטול בכך חלק תנאי החיים, 'נסיבות' ו'סביבה'; לא בדרך שראו זאת

שהיא מעבר לרבגוניות; משום ששירטט גבול בין האורגני לאי-אורגני, ומיקד את ניתוח הגופים החיים בארגונים - בקיצור, מפני שתרם תרומה ראשונית לכינונה של הביולוגיה כמדע. כתביו של לאמארק, בתקופה השנייה של פעילותו, ייצגו מעבר בין שתי צורות ידע. בכמה מהם כבר התבטאה עמדתה של המאה ה-19, ואילו באחרים עדיין השתקפה עמדתה של המאה ה-18. למשל, אצלו כל היצורים החיים עדיין יוצרים רשת רציפה, אותה שרשרת ישנה-נושנה, העושה את דרכה מקצה אחד של עולם-החי אל קצהו האחר. כבופון, גם לאמארק לא האמין שמינים או סוגים אמנם קיימים בטבע. לדבריו, 'יש רק פרטים-יחידים', צורות 'שהן קרובות זו לזו, סוככות זו על זו, ומשתלבות זו בזו'. אם נתקלים בפער בדירוג, הרי זה משום שנוסבות היצוניות, אנומליות באורח-החיים או שינויים בהרגלים הפריעו לסדירות של ההתקדמות. או גם משום שהידע שלנו איננו שלם ולכן אין מכירים את כל החוליות בשרשרת. הפער שהפריד כמדומה בין הציפורים ליונקים הולך ונסגר מאז התגלה קיומם של בעלי-חיים מתווכים, כמו אורניתורניקוס ואַכִּינְדָּה. למעשה, רק משום שעדיין ראה סדרה ליניארית בעולם-החי, יכול היה לאמארק לפרש אותו כתוצאה של סדרת אירועים כרונולוגית. רק מאחר שהטבע לא עשה שום קפיצות פתאומיות יכלו יחסים-של-שכנות להשתנות ליחסים של צאצאות. 'הוא [הטבע] פועל לפי סדר שקל להבחין בו, היות שהוא מנוגד לגמרי למה שאנו מבחינים בו כשאנו מסתכלים בכל היצורים החיים: מהמושלם ביותר לפשוט ביותר'.

גם בשאלת ההכרחיות של עולם-החי במצבו הנוכחי, שיקף לאמארק את עמדת המאה ה-18. אין ספק שלדעתו, התמונה המתקבלת מן היצורים לא נשארה ללא שינוי במהלך כל התקופות. השרשרת לא היתה גמורה כבר בשחר העולם ועד עתה. הזמן הכניס חידושים. הוא הוסיף חוליות, זו אחר זו, קצה לקצה. אולם לדעתו, בסיכומו של דבר, התמונה, כפי שהיא נראית בימיו, איננה שונה בהרבה ממה שהיא. אף-על-פי שהוא מסרב לראות את עולם-החי כתוצאה של כוונה, או כהשגת יעד של כוח עליון, לאמארק מייחס לחיים האנימליים 'סיבה ראשונית ושלטת', הנותנת להם את היכולת לגרום לארגון ליהפך בהדרגה למורכב יותר ולמושלם יותר.

סטיה. אין הם יכולים להתמודד עם הבלתי־צפוי, עם נסיבות מיוחדות. מכאן הכורח שסביבה תפעל על התורשה דרך תשוקות, צרכים, הרגלים ופעולות. משעה שהארגון של פרטים־יחידים מסוימים השתנה בדרך זו, 'הפך' והרביה שבין הפרטים שמדובר בהם שומרת את השינויים שנרכשו'.³⁵ הפלסטיות של מבנים חיים והגמישות של מנגנוניהם מאפשרות לאורגניזם, לא להחדיר את עצמו לעולם הסובב אותו, אלא להיפך, להחדיר את העולם הזה בהדרגה לתורשה שלו.

לא היתה זו הפעם הראשונה שהועלה הרעיון בדבר פעולה ישירה של סביבה על תורשה. מזמנים קדומים ביותר, רק העברת הניסיון שרכשו פרטים־יחידים לצאצאיהם היא היכולה כנראה להסביר את ההרמוניה השוררת בין האורגניזמים לטבע. אולם מעולם לא נוצל רעיון זה בדרך כה שיטתית ובפירוט כה רב – וגם לא בביטחון כה רב, שכן לאמארוק ראה כמובן מאליו שאיבר געלם מאחר שאין לו שימוש. לדידו, ללוויתנים ולציפורים אין שינויים, מאחר שאין הם זקוקים להן. החולד איבד את השימוש בעיניו, מאחר שהוא חי בחשכה. לרכיכות אֶצְפָּלִיּוֹת אין ראש, מאחר שאין להן צורך בו. באותה מידה מובן שאיבר מתפתח מפני שנעשה בו שימוש תכוף. לברבור צוואר ארוך, מאחר שהוא ניזון מבעלי־חיים החיים במים. כף רגלו של הברווז מצוידת בקרום שחיה, מאחר שבעת השחיה הוא מכה במים. לבעלי־חיים טורפים יש טפרים חדים, מאחר שהם צריכים לטפס על עצים, לחפור באדמה ולפרק את טרפם. תכליתיות, לדעת לאמארוק, איננה כרוכה בכוונה ראשונית, בהחלטה ליצור עולם־חי ולכוון בהדרגה את התפתחותו. תכליתיות עשויה מתכליות קצרות־מועד, כביכול, שכל אחת ממוקדת בהבטחת שלומו של האורגניזם שייווצר מאוחר יותר, שהרי כוונה סתגלנית תמיד מקדימה מימוש. ולבסוף, התוכנית שהטבע פועל לפיה מיועדת לספק לעולם אורגניזמים שהם תמיד מורכבים יותר, מושלמים יותר וסתגלנים יותר. אם לא די בהתקדמותם הטבעית של אורגניזמים, הרי היא מתוקנת מראש. התוצאה של ביצוע התוכנית היא איפוא סדרה של תכליות קטנות מצטברות. לאמארוק מתאר באריכות מדוע דברים מתרחשים, אך כמעט איננו אומר איך הם מתרחשים. לעולם איננו מזכיר מחקרים או תצפיות, שנועדו לגלות

מופרטואי, בופון ודידרו – לדעתם, תנאים חיצוניים רק עודדו את הנצחתם של אורגניזמים שכבר היו קיימים או הקשו עליהם לעשות זאת – אלא על-ידי פעולה ישירה על התכונות, המבנה והתורשה של היצורים החיים. כדי שבעלי-חיים ייצאו מן המים צריך היה 'להביאם בהדרגה מחיים במים לחיים על גבול המים, ואחר-כך לחיים בחלקים יבשים שעל כדור-הארץ'. כשהיו על היבשה, משהתנסו בתשוקות חדשות, פיתחו הרגלים חדשים ורכשו ארגון המתאים יותר למצבם. כבר קאבאניס טען, שצרכים או אפילו תשוקות מעוררים את פיתוחם של כלים לסיפוקם – כלומר, איברים. לאמארק טען, שרשת שלמה של פעולות-גומלין נוצרת בין 'תוצר הנסיבות פסיבה לדרישות חדשות, ההשפעה של פעולות חוזרות ונשנות היוצרות הרגלים ונטיות, התוצאה של שימוש גובר או פוחת באיבר מסוים, והאמצעי שהטבע משתמש בו כדי לשמר ולשכלל כל מה שהושג בארגון'.³⁴ אף-על-פי שהיכולת הטבעה בכל היצורים החיים להגדיל את מורכבות מבניהם די בה כדי להבטיח את הטרנספורמציה של האורגניזמים ואת שיפורם, הנסיבות החיצוניות הן המפריעות להתקדמותם הסדירה ומציבות אותם על נתיבים חדשים.

הניגוד התמידי בין כשריו של האורגניזם עצמו ובין נסיבות חיצוניות מקורו במה שלאמארק מחשיב כאחת התכונות של היצורים החיים, שאין חולק עליהן כלל: כוח ההסתגלות (adaptation) שלהם לתנאי החיים, ההתאמה בין האורגניזם לסביבתו המיידית. עמדתו של לאמארק, כמו זו של המאה ה-18, היתה מבוססת על ההרמוניה החייבת לשרור ביקום. עולם-החי היה לא רק העולם הטוב ביותר, אלא גם העולם היחידי האפשרי. שום משבר איננו יכול להתפתח בין היצורים החיים לטבע, שום קרב בין האורגניזמים לבין עצמם לשם כיבוש טריטוריה, שום מאבק-קיום מהסוג שכבר הזכיר מאלתוס ומאוחר יותר הניתו דארווין וואלאס. לדעת לאמארק, כאשר נוצר יצור חדש שאיננו תואם להתקדמות הסדירה, הרי זו הסתגלות לנסיבות מיוחדות. זריאציות מביאות תמיד תועלת. אולם יכולתו של החי לשכלל ארגון לא די בה תמיד ליצור צורות מועילות. אף-על-פי שהתורשה יוצרת, אין היא מסתגלת. תוצריה ושכלוליה החדשים הם סדירים, ללא פנטסיה או

נסוג למינרל. בהיותו במצב זה, החומר מחכה להזדמנות לבריאה ספונטנית כלשהי, כדי להתחיל ולטפס שוב ממרגלות הסולם לפסגתו, כבעל־חיים או כצמח. גם גבוה יותר בסולם עשויות להיות נקודות כניסה נוספות לבריאה ספונטנית; ברמה של 'תולעי מעיים', למשל, של 'תולעים מסוימות הגורמות מחלות עור, או של פטריות, עובש, אפילו טחב'.³⁸ מחזוריות מעין זו מקיימת את עולם־החי במצב שהיום היינו מכנים אותו מצב של שיווי־משקל דינמי. דבר איננו משתנה, שהרי כל מה שנעלם מתאזן בדיוק על־ידי מה שמופיע. אי־אפשר לסלק שום שלב של הסולם, ושום קבוצה של בעלי־חיים איננה יכולה למות ולהיעלם. כאשר נוצר חלל ריק עקב שואה, הוא מתמלא מיד, כמו בור מים, על־ידי הזרם העולה. כשאורגניזמים זזים למעלה ומשאירים חלל ריק, באים אחרים למלא אותו. כתוצאה מכך אין עולם־החי ניתן לשינוי. הוא שומר על שיווי־המשקל שהיצורים החיים כופים עליו. הוא מותאם תמיד להרמוניה שנקבעה מראש. מאחר שנוצר בסדרה של תמורות, הוא נחתן באי־השתנות של עולם נברא.

לאמאק ניצב איפוא בדיוק בנקודת המעבר מהמאה ה-18 למאה ה-19. הוא תרם, אולי יותר מכל חוקר אחר, לשינוי בהשקפה אשר לפיה הופרד החי מהדומם ואשר ביססה את הביולוגיה כמדע. הוא עזר, יותר מכל חוקר אחר, לעשות את הארגון למרכז הגוף החי, המקום שבו מצטרפים כל החלקים הרכיביים, כדי לאפשר לשלם לתפקד כראוי. מאחר שבחר בארגון כנקודה שבה הזמן פועל, הוא יכול היה לתאר בבהירות רבה יותר משאר בני־זמנו – גתה או ארסמוס דארוין – את עולם־החי כולו כתוצאה של טרנספורמציות רצופות, כהתפתחות הולכת ומתקדמת של מבנים וטיפקודים. אולם חדשני ככל שעשוי להיראות התיאור של טרנספורמיזם מוכלל, בכל זאת היה מבוסס על ייצוג עולם־החי כפי שהוא נתפש במושגי המאה ה-18. הטרנספורמיזם של לאמאק היה שרשרת היצורים הליניארית, הערוכה במעקובת זמן ליניארית. את סדרת התמורות ניתן היה להעלות על הדעת רק על־ידי רציפות של המרחב. בגלל עובדה זו עצמה, סולקה כל תכונה אופיינית מקרית בסידורו של עולם־החי. מאחר שלא הצליחו למצוא די טיעונים מחמירים ותצפיות ביקורתיות ב-*Philosophie zoologique*, דחו בני־זמנו של

תהליך שִׁרְשָׁה לגורמים היצוניים לפעול על התורשה. אין הוא מתייחס לתצפיות של האלר או שארל בונה, שאורגניזמים נשארם קבועים, למרות קטיעות חוזרות ונשנות של איברים, דור אחר דור. אין כל הצעה לערוך גיסויים הדומים לאלה שכבר הציע מופרטואי, כדי לקבוע האם התורשה לומדת מהגיסיון. יש רק התייחסות ל'נוזלים פנימיים', הפועלים על 'החלקים הגמישים של בעל-החיים', כדי לחזור בהם תעלות, לשנות את מקומן של מסות, או אפילו לבנות איברים; בקיצור, לעצב בהדרגה את הגוף. כתביו של לאמארק עדיין מכילים ניחוח ישן-ישן של מכניזם, עם הסדירות והרציפות של תנועה מתמדת או מואצת באופן אחיד.

בסיכומו של דבר, לטרנספורמיזם של לאמארק היו שני כוחות מניעים. אכן, 'ברור שהמצב שבו אנו מוצאים את כל בעלי-החיים הוא, מצד אחד, תוצר של מורכבות הולכת וגדלה של הארגון המובילה לדירוג סדיר, אולם מצד אחר, הוא תוצאה של השפעת נסיבות רבות, ושונות מאוד, הנוטות כל הזמן להרוס את סדירות הדירוג של המורכבות ההולכת וגדלה של הארגון'.³⁶ מכאן, ראשית, יש הזרם הרציף, המתקדם לאורך הדרך הראשית – ההתקדמות האיטית, הסדירה והבטוחה, המובילה מסות גדולות במעלה סולם הטבע. שנית, יש תנועות מקומיות, הפרעות אשר מבלי להשפיע על המסות גורמות 'סטיות', 'התגוונויות' ו'נסיגות'. לבסוף, כדי לשמור על עוצמתו של הזרם המרכזי, יש זרימה יציבה של אורגניזמים פשוטים מאוד, הנוצרים בקביעות מחומר אי-אורגני. בתחתית הסולם מוסיף הטבע כל העת לפעול עלידי 'בריות ספונטניות או ישירות, שבאמצעותן הוא מחדש ללא הרף כל אימת שהנסיבות מתאימות'.³⁷ הוא מוסיף לייצר כל העת 'יצורונים בעלי ארגון פשוט ביותר... שאיש לא היה חושד כי ניחנו באימיליות'. ברגע שנוצרו, אורגניזמים אלה מצטרפים לזרם המרכזי ומתחילים לעלות בסולם היצורים הפשוטים ביותר הם איפוא גם המאוחרים ביותר. בקצה האחר של ההירארכיה מצוי האדם, אשר בא לפיכך מהאורגניזמים העתיקים ביותר. טרנספורמציה איננה ממשיכה מעבר לכך. ובכל זאת, המסה החיה איננה מצטברת בפסגה. במקום לגדול ללא גבול, אוכלוסיית האדם מגוטררת. שהרי בעוד זרם הגופים האורגניים עולה בסולם, אלה שבפסגתו חוזרים למצב האי-אורגני. בהדרגה, החי

בזה, ההיסטוריה נעשית תנועה בזמן שבגללה נעשה היקום מה שהוא, תהליך התפתחות, שינוי מהפשוט ביותר למורכב ביותר; בקצרה, 'אבולוציה' הנוולדת משרשור פנימי של תמורות. וכך מתהפכים קשרים רבים בין הדברים או בין היצורים. אבולוציה בזמן היא הקובעת את היתסים במרחב. אם מדובר בשכל או בטבע, אי־אפשר עוד להתייחס למוצא כאל לידה, בריאה שממנה התפתחו היסטוריות בהשפעת פעולתם של דחפים חיצוניים. המוצא נעשה 'הנקודה הנעלמת' של ההיסטוריה, איזור ההתכנסות ההכרחי, שבו נפגשים כל המתווים הגולמיים של ארגון, שבו נעלמים כל הסטיות, כל האי־התאמות, כל ההבדלים.

האבולוציוניזם של דארוין ושל ואלאס נבדל באופן קיצוני מכל דרכי המתשבה הקודמות ביישום רעיון האקראיות ליצורים החיים. עד המאה ה-19 היתה השרשרת הארוכה של היצורים חלק מההרמוניה של היקום. בעולם היצורים פעל כורח, כמו זה שבעולם הכוכבים. לא העלו על הדעת שאי־פעם הגופים החיים יכולים היו להיות שונים ממה שהם בהווה. אולם לא היה אפשר להטיל ספק בכורה זה כל עוד לא טולטל המרחב שעולם־החי מצוי בו על־ידי האנטומיה המשווה, האמבריולוגיה וההיסטולוגיה. היו לכך כמה סיבות. ראשית, סינתזה בזמן איננה יכולה להתבסס אלא רק על הייצוג המתקבל מחקירות הנערכות במרחב. כל עוד היה עולם־החי מסודר כשרשרת רציפה, אפשר היה לראות את רצף התמורות רק בדרכו של לאמארק: כסדרה של דירוגים, הנעה בצעדים ליניאריים מהפשוט ביותר אל המורכב ביותר. משעה שנותקה הרציפות בקשר האופקי בין הגופים החיים, משעה שתולקו היצורים מחדש ל'ענפים', כבר לא ניתן היה לראות את הקשר האנכי כמעקובת יחידה־במינה. ואז קבוצות של יצורים המבודדים זה מזה גם אינם נושאים עוד את חותם הכורה.

לאחר מכן, תיאוריית התא טוותה רשה חדשה של קשרים אופקיים ואנכיים כאחד בין היצורים. התא נעשה מיד הרכיב האוניברסלי של כל הגופים החיים, והגורם המחבר כל דור לדור הבא אחריו. ההתפתחות של כל אורגניזם, אפילו הפשוט ביותר, נעשתה עתה תמיד בסדרה של טרנספורמציות, שבמהלכן התאים מתרבים,

לאמארוק את התיאוריה שלו, אפילו אלה שחיפשו בסיס משותף לארגונים של כל היצורים החיים. בדרך-כלל הם ראו בחיבור זה רק פיתוח של רעיונותיו של בופון עד קיצוניות, אם לא עד אבסורד.

מאובנים

בטרנספורמיזם של לאמארוק יש היבט העולה בקנה אחד עם מחשבת המאה ה-19, והוא הכוח המניע של הזמן בגזירתם של ארגונים מורכבים יותר ויותר זה מזה. זהו כוח הבריאה שמיגוון האיברים, כל אחד בנפרד, מעניקים למערכת היחסים ביניהם. במאה ה-19 סוגיית הראשית מוצגת למעשה בדרך חדשה, בהקשר למושאים, שבהם אין היסודות הרכיביים ערוכים זה בצד זה סתם בעלמא, אלא מחוברים זה לזה ברשת יחסים שלמה. ארגונים אלה, מבנים אלה מסדר גבוה יותר, הקובעים כיצד ערוכים החלקים השונים ביצורים ובדברים ונותנים משמעות לחלקים ולשלם כאחד, לא הוצבו במקומם לפי סדר שנקבע מראש בימי בראשית. עתה, ארגונים אלה לא קדמו להיסטוריה, שאמורה היתה לאחוז בהם ברגע הבריאה ולהעבירם לרשותו של הזמן, היכול רק לטלטל את הסדר ההתחלי ולהפריע לסיווג. המערכות שאפשר לצפות בהן בהווה לא נוצרו אחת ולתמיד; הן נוצרו ברמות שונות, בשלבים רצופים, במהלך האירועים שחיברו בהדרגה את היסודות זה לזה, ובתוך כך סידרו אותם בצורות מסוימות ושינו בהתמדה את הקשרים ביניהם, כדי לעשותם מורכבים יותר. אם יש דמיון בין טיפוסי ארגונים מסוימים, כבר אין זה בזכות הרמוניה קבועה מראש, שמעבר לידיעה, אלא משום שעברו שלב משותף מסוים בסדרה של תמורות. לפיכך, לא די להכיר קווי-דמיות במרחב, כדי לקבץ יחד גופים בעולם; צריך לציין גם את הרצף שלהם בזמן. לא יתכן שכל מה שניתן לראות בתחום אמפירי כלשהו הופיע בבת-אחת, או אפילו נצפה מראש בהתאם לתוכנית שנהגתה מראש. הוא התממש בתנועה דיאלקטית מתמשכת, שבה הניגודים הולכים ומתמזגים זה בזה, וכמות יוצרת איכות. תכליתיות המושאים המרכיבים את העולם טמונה בכורח שלהם, שאותו אין להפריד עוד מן האקראיות שלהם. במקום רשימה כרונולוגית של אירועים בלתי-תלויים זה

משקל, לחץ, תנועה, חום, אור וחשמל; בקיצור, כל דבר שפעולתו יכולה להשפיע על גוף חי. אולם לא היה זה תהליך חד-כיווני, אלא האורגניזם וסביבתו פעלו זה על זה. 'היות שלפי החוק הכללי של שוויון-הערך הנחוץ בין פעולה לתגובה', אמר קונט, 'המערכת החיצונית לא תוכל לשנות אורגניזם מבלי שגם הוא עצמו ישפיע עליה.'⁴⁰ מעתה לא היה אפשר עוד להפריד את האורגניזם מסביבתו. המערכת כולה היא המשתנה ובה מתרחשת הטרונספורמציה.

לפיכך, כבר לא היה אפשר לדבר על הזמן המיוחד ליצורים, זה של דורותיהם הרצופים, ועל זמן חיצוני, זה של התהפוכות שאירעו בקרום של כדור-הארץ. במאה ה-18, הזמן של כדור-הארץ, על שואותיו, על שינויי הטמפרטורה וההפרעות האחרות שאירעו בו, שיבש את הסדר של היצורים, שהיו שקועים בשיגרת רבייתם ללא שום היסטוריה. לעומת זאת, לדעת לאמארק, הזמן המיוחד ליצורים גרם להתקדמותו של החי, בעוד שהזמן של הנסיבות התערב רק לפעמים כדי לאפשר ליצורים להסתגל לסביבתם המיידית ולעצב את עצמם לפיה. במאה ה-19 כבר לא יכול היה להיות אלא זמן כללי ליקום כולו. אין להפריד איפוא בין ההיסטוריה של היצורים ובין ההיסטוריה של כדור-הארץ. המאובנים החלו אז לשחק תפקיד חדש. במאה ה-18 הם דמו לצורות הקיימות והעידו על קביעותם של הגופים החיים. לדעת לאמארק, הם עזרו להדגים את האי-יציבות של החי והצביעו על תמורות מסוימות. לדעת קובינה, הם היו אבני-הדרך של הזמן הגיאולוגי; הם 'האנדרטות של מהפכות העבר' שיש לשחזרן ולפענחן. יש רק היסטוריה אחת, ההיסטוריה של הטבע, המסופרת לעתים על-ידי הסלעים ולעתים על-ידי המאובנים; האדם צריך ללמוד לאסוף את כל הסימנים ולהתאימם זה לזה. המאובנים מספרים לנו כי לא תמיד היתה לכדור-הארץ אותה מעטפת כמו זו שיש לו היום, שכן אנו בטוחים כי הם חיו על-פני האדמה לפני שנקברו במעמקיה. לעומת זאת, בסלעים מתגלות שכבות בלתי-רציפות בקליפת כדור-הארץ, במקומות ששקעו בהם שרידים של יצורים חיים. רק שימוש בחוק-המיתאמים בחקר המאובנים ושחזורו של גוף מאורגן שלם מתוך מיקטע שלו, מאפשרים לנו להגדיר את רצף התצורות הגיאולוגיות ולאתר את השואות שיצרו

מתמיינים ומתארגנים בסדרה של צורות. לעתים קרובות יש אנלוגיות בין התפתחויות אוטווגנטיות, לעתים אפילו קטעי נתיב משותפים. אולם גם כאן לא כרוך בדבר שום כוונה, לא בנתיב שאומץ בעת ההתפתחות וגם לא באופן הסתדרותם של התאים ובנייתם של המבנים.

פיזור האיברים בגוף החי גם הוביל לדרך התבוננות חדשה לגמרי בעצם אפשרותה של הווריאציות. האורגניזם מקופל סביב מרכזו בשכבות חופפות ומשולבות, ואף מתפשטות אל מעבר לו וקושרות אותו אל סביבתו המיידית באופן שלא ניתן לנתקו ממנה. ככל שהם רחוקים מהמרכז, כן פוחתת חשיבותם של האיברים והם יכולים להשתנות ביתר קלות. החלקים שעל שטח־הפנים נעשים כה שוליים, עד שלמעשה אין עוד שום אילוץ המגביל את השינויים היכולים לחול בהם. לדעת קוֹבֵיִה, כדי שיופיע שינוי כלשהו 'אין צורך בשום צורה, בשום תנאי; דומה שלעתים די קרובות גם אין השינוי צריך להביא תועלת כדי שיוכל להופיע; די שיהיה אפשרי, כלומר שלא יהרוס את ההרמוניה של השלם'.³⁹ עמדה זו שונה לגמרי מעמדתו של לאמארק. הווריאציות של היצורים איננה תלויה בהכרח ברעיון התועלת, הצורך או ההתקדמות. היא יכולה להתרחש ללא שום סיבה.

לבסוף, טיב היחסים המאחדים את האורגניזם עם סביבתו המיידית השתנה גם הוא. לדעת לאמארק, 'סביבה מיידית' היוותה רק אחד מן המדדים של 'נסיבות'. היא הגדירה את איכות החומר שבו מונח אורגניזם זה או אחר: אוויר, מים מתוקים או מי־ים. בעל־החיים הונח בסביבה מיידית מסוימת, ככל גוף אחר על־פני האדמה. אולם עדיין לא היו שום יחס קרוב בין האורגניזם לסביבתו המיידית, שום פעולת־גומלין אמיתית. אף־על־פי שהסביבה המיידית השפיעה לעתים קרובות על מבנהו של יצור, היה זה בדרך עקיפה, מתוך צורך או תשוקה; מפני שהיצור צריך היה לנשום, להזיז ולנוע באוויר או במים. אולם עם אוגוסט קונט הפכו סביבות מיידיות ונסיבות ל'סביבה' (environment) בה"א הידיעה, וזכו למעמד חדש. מעתה הסביבה מייצגת את כל המשתנים החיצוניים שהיצור החי כפוף להם – לא רק האוויר והמים המקיפים את האורגניזם, אלא גם

כדור־הארץ דומים לאלה השוררים בו כיום. ואם כי קוביה עצמו לא הביע דעה זו ישירות, תלמידיו לא היססו לדבר לא רק על בריאה אחת, אלא על כמה בריאות, שבאו בזו אחר זו לאחר כל שואה.

רעיונותיו של קוביה בדבר תהפוכות גיאולוגיות על כדור־הארץ חשפו אותו לביקורת רבה. הם תוארו לעתים קרובות בעבר – וגם בימינו – כביטוי של גישה נסוגה, שמרנית ואפילו תיאולוגית, שעייכבה את בואה של המחשבה האבולוציונית. אולם דומה שברור למדי, כי את המאפיין העיקרי של האבולוציוניזם – האקראיות של החי – לא היה אפשר להעלות על הדעת כל עוד נטען שהיצורים מצויים במסגרת נוקשה, שהם מתקדמים לעבר השלמות בשורה עורפית. פיזור הצורות החיות, השברים בזמן שבראו אותן ווריאציות חסרת־סיבה – היו שלושה תנאים מוקדמים לכל תיאוריה של אבולוציה. כל השלושה היו פרי עבודתו של קוביה.

הגיאולוגים הם שגירשו את שד השואות. שכן התפזרות לאזורים מובחנים ונסיגה לאיים קטנים מבודדים אירעו לא רק בעולם היצורים החיים, אלא גם בעולם המינרלים. אולם, כדי להסביר תצורות גיאולוגיות, כבר לא צריך היה להזדקק לשואות יוצאות־דופן. די היה במה שלייל כינה בשם 'עקרון הסיבות הממשיות'. כל העדויות בדבר עברו של כדור־הארץ מתגלות בו עצמו, מוכיחות שסדרה של שינויים אירעו. אבל שינויים קדומים אלה, שאירעו על שטח פניו של כדור־הארץ, נגרמו עלידי גורמים הדומים בטבעם ובעוצמתם לאלה הפועלים כיום. לדעת לייל,

כדי להסביר את התופעות הנצפות, אנחנו יכולים לוותר על הסברתם של אסונות כלליים פתאומיים ועזים, ולהתייחס לשינויים שאירעו בתקופות קדומות ונוכחיות... כשייכים לסדרה אחידה ורציפה של שינויים.⁴³

משעה שהיה אפשר לקרוא את הסימנים החבויים בשכבות הגיאולוגיות, העדויות המתגלות בהם מלמדות שתנאי אקלים, סחף והתפרצויות וולקניות בתקופות קדומות, לא היו שונים מאלה שבזמננו. אפשר לראות גזעי עץ זקופים ששורשיהם עדיין נעוצים באדמה, בבוץ ובחול שהתקשו והתאבנו בימים קדומים, אפשר

אותן. ולהיפך, בדיקת שכבות גיאולוגיות מתארת את בתי־הגידול של המינים שנכחדו. הגיאולוגיה מצביעה על הקשרים בין היבשות, ואילו המאובנים מספרים על הניתוק ביניהן.

לדעת קוביה, עובי הסלעים השונים ומיקבץ של מאובנים שונים בכל שכבה ושכבה מייצגים את עקבותיהן של 'מהפכות' שאירעו באורת פתאומי על־פני כדור־הארץ בכמה הזדמנויות. בגלל שואות אלה לא יכלו בעלי־החיים להישאר כפי שהיו לפניהן. השברים ברצף המרחב המאכלס את היצורים החיים משקפים אך ורק שברים בזמן־האדמה. אפשר לראות ש'לקונכויות בשכבות העתיקות יש צורות משל עצמן,' אמר קוביה,

ובהדרגה הן נעלמות, מאחר שאין מוצאים אותן עוד בשכבות צעירות יותר, ועוד פחות בשכבות הנוכחיות, שבהן לעולם אין מוצאים מינים אנלוגיים, אפילו לא אחדים מבני סוגם; לעומת זאת, קונכויות בשכבות צעירות דומות לקונכויות של בנות סוגן החיות באוקיינוסים שלנו.⁴¹

לפיכך, אין שום דבר משותף בין מה שחי בזמנים הקדומים ביותר ובין מה שחי בהווה. שואות שחרשו את קליפת כדור־הארץ השמידו לגמרי את יושביו. בדרך זו נעלמו יצורים רבים לאין ספור.

אלה שחיו על היבשה נבלעו על־ידי שטפונות; אחרים, שאיכלסו מים עמוקים, נשארו גבוה ביבשה כשקרקעית הים התרוממה לפתע; גם על גזעים אלה בא קץ ונשארו בעולם אך ורק מיקטעים מעטים, שאפילו חוקרי־הטבע מתקשים לזהותם.⁴²

אין שום עקבות של קו־מוצא יחיד לאורכו של עולם־החי, של סדרת שינויים, שבגללם עשוי היה כל מין להיגזר בהדרגה ממין אחר. גם אין זו שאלה של חיבור הפשוט למורכב על־ידי רצף של וריאציות, שעשויות היו לקדם את ממלכת־החי בהדרגה ולהביאה למצבה הנוכחי. הטבע נקט את כל אמצעי הזהירות כדי למנוע את השינוי במינים ודאג שהקווים העיקריים של הארגונים יישארו קבועים. הגזעים העכשוויים 'אינם יכולים להיות המודיפיקציות של גזעים אבודים'. לא יתכן שתנאים ששררו בעבר על פני

הם זהים בשכבות אופקיות רחבות, אך משתנים במהירות בחתכים אנכיים; שלישית, תכולת השרידים האורגניים. לדעת לייל, עצם טבעם הוא 'המעניק למאובנים את ערכם הגבוה ביותר כמאבחינים כרונולוגיים, בהאצילו לכל אחד מהם, בעיניו של הגיאולוג, אותה סמכות שיש למדליות בהיסטוריה שלנו'.⁴⁵ לפיכך, על-פי התצורות האלה, המכילות מאובנים, ניתן לקבוע את הגיל היחסי בקלות רבה ביותר. תחילה קובעים את הכרונולוגיה של תצורות אלה, לאחר מכן מייחסים, עד כמה שאפשר, את קבוצות הסלעים השונות לחלקות הכרונולוגיות האלו. ניתן לסווג סלעים, על-פי מוצאם וגורמי יצירתם, לארבע קבוצות עיקריות: סלעי מישקע, סלעים פלוטוניים, סלעים וולקניים וסלעים מטמורפיים. אולם ארבע מחלקות סלעים אלו לא נוצרו בסדרה אחת, ואין הם מתייחסים בהכרח לתקופה מסוימת. מכאן, שאי-אפשר לשחזר את רצף התקופות הגיאולוגיות רק על-ידי בדיקת הסדר האנכי של שכבות המונחות זו על גבי זו באיזור מסוים. יש מעין 'טרנסמוטציה' של סלעים, כשהמסות המאובנות הופכות בהדרגה למסות גבישיות. ותהליך זה, הנמשך גם בימינו, פועל כל הזמן. מירבצי מישקע ומירבצי מאובנים נוצרים בימינו באגמים שונים, ואילו תצורות וולקניות מופיעות במקומות אחרים. באותה דרך נוצרו בכל תקופה בעבר מישקעי מאובנים וסלעים לוחיים על שטח-הפנים, בעוד ששכבות מישקע מסוימות, שהיו שרירות בתנאי חום ולחץ, קיבלו מבנה גבישי. אם כן, אפשר להשוות את המיקום היחסי של סלעים רק באזורים מצומצמים, מפני הזחת מאיזור אחד למשנהו. לכן, אמר לייל, צריך להתייחס לארבע מחלקות הסלעים העיקריות 'כאל ארבעה סדרים של מונומנטים, הקשורים לארבע סדרות של אירועים בני הדור, או כמעט בני הדור'.⁴⁶

וכך הפריד המחקר הגיאולוגי את קליפת כדור-הארץ לשתי סדרות במרחב, אנכית ואופקית, שניתן לרשום אותן במעין לוח כרונולוגי. כל קו אופקי בלוח מתאים לשכבות מינרלים ומאובנים של אותה תקופה; לייל הבחין בארבע שכבות וכינה אותן בשמות: אאוקן, מיוקן, פליאוקן קדום ופליאוקן חדש. אנכית, ארבע מחלקות עיקריות של סלעים 'יוצרות ארבע עמודות מקבילות, או כמעט מקבילות'.⁴⁷ אפשר איפוא להגדיר כל גוף המצוי בקרום כדור-הארץ,

להבחין בסימנים שהשאירו גלים הדומים לאלה שבחופים המוכרים לנו כיום. כשמשווים, כמו שעשה לייל, את הסימנים שהשאירו טיפות גשם בסלעים מכל הזמנים, הרי זה כמו לבחון עקבות שמשאירים בחול מימטרים היורדים בהפרש של כמה ימים זה מזה. הצורות והגדלים של הטיפות, שהם כמעט זהים, מעידים שהתנאים האטמוספריים היו דומים. לא נראה שהגשם או האבק, וגם לא המדבריות, הקרח או הרוחות היו אי־פעם בעבר שונים ממה שהם כיום. מובן שכל עדות מצביעה שתהפוכות עזות פיסלו את פני כדור־הארץ. רכסי הרים התרוממו מלב האדמה או נקברו במעמקיה; עמקים נפערו לפתע, לאחר מכן התמלאו, ושבו ונפערו; הימים פלשו ליבשה ושבו ונסוגו. אך כל השינויים הללו יוצרים סדרה של אירועים ללא שום הפרעות של ממש, רצף של תקופות, שבמהלכן קיבל קרום כדור־הארץ את צורתו הנוכחית. כשלומדים כיצד מסודרות המסות של המינרלים הקבורים באדמה, ניתן לשחזר את הסדר הגיאולוגי של כדור־הארץ. הסלעים מראים סדרה כרונולוגית חשובה של תנועות, המעידות על רצף של אירועים במהלך ההיסטוריה המוקדמת של כדור־הארץ ושל האוכלוסיות שלו. במהלך כל התמורות, ולמרות שינויים בתנאים, בנסיבות, באקלימים כלליים או מקומיים, גורמים מעין אלה הביאו לצבירה של אותו חומר ויצרו שכבות דומות. כל זה קרה מבלי להפר את החוקים שגם בימינו עדיין קובעים את היווצרותם של קרקעות, מישקעים וסלעים. לדעת לייל, מדע הגיאולוגיה 'מחפש ברצינות, בסבלנות ובהתמדה קשרים בין תופעות גיאולוגיות קדומות ובין התוצא של השינויים המתחוללים כיום לנגד עינינו או אולי מתחוללים באזורים שאינם נגישים לתצפית, ושעל הממשות שלהם מעידים הרי געש ופעילויות תת־קרקעיות'.⁴⁴ העבר אמנם יצר את ההווה, אך רק ההווה יכול להסביר את העבר.

מעתה כבר לא היה די לסווג סלעים אך ורק על־ידי בדיקת המבנה והמירקם שלהם. צריך היה להתחשב גם במוצאם ובגילם, כדי להסיק על סדר היווצרותם. שלושה קריטריונים שימשו כדי לקבוע את גילה של מסה מינרלית: ראשית, הסופרפוזיציה שלה, כלומר, מקומה ביחס לסלעים האחרים שמסביבה: המסה התחתונה ביותר היא הקדומה ביותר; שנית, אופים של המינרלים, שלעתים קרובות

מהם מאכלס אוסף מסוים של בעלי-חיים וצמחים. באותה דרך מתלקת הגיאולוגיה יצורים מזמנים קדומים על-פני מתוזות רבים ביותר, שכל אחד מאכלס אוסף מיוחד של בעלי-חיים וצמחים, מחוזות שבימינו קבורים באזורים שונים בשכבות שונות. דומה איפוא שרצף היצורים החיים שעל-פני כדור-הארץ לא התפתחו בשרשרת אחת של טרנספורמציות, אלא 'על-ידי הופעתם מעת לעת של צמחים ובעלי-חיים חדשים על פני כדור-הארץ'.⁴⁹ כדי שיוכלו לגדול ולהתרבות בזמן מסוים, צריכים היו אורגניזמים חדשים אלה להתאים לתנאי הקיום ששררו באותו מקום ובאותו זמן.

ירידה למעמקי קרום כדור-הארץ דומה להליכה לאחור בזמן. אם נשתמש בדימוי של ליל, הרי ארכיוני הגיאולוגיה מתארים את ההיסטוריה של כדור-הארץ, הכתובה בניב משתנה שהשתמר באופן חלקי; רק הכרך האחרון של היסטוריה זו נמצא, ומצב דפיו הוא כה גרוע, עד שניתן לפענח רק מיקטעים מכל פרק, דפים ספורים פה ושם. אוצר-המלים של שפה זו, המשתנה בהדרגה מפרק לפרק, יכול לייצג במידת-מה צורות שחיו פעם ואחר-כך נקברו בתצורות אדמה רצופות, אשר לתוכן הושלכו כמדומה. בעת השוואת הפרקים האחרונים, בעת הניסיון לקרוא, לפי הסדר שהונחו השכבות זו על-גבי זו, את הגיל היחסי של המאובנים שהן מכילות, מתבררים יחסים חדשים בין משפחות או מינים שנכחדו ובין אלה החיים כיום. לדעת הומבולדט, 'כל התצפיות מלמדות, שככל שהצורות המאובנות והצמחיה המאובנת עמוקות ועתיקות יותר, כן גדול ההבדל ביניהן לבין צורות בעלי-החיים והצמחים בני-ימינו'.⁵⁰ בעולם היצורים כמו בעולם הסלעים, ההווה מתאים איפוא יותר מכול לשכבה החיצונית של קרום כדור-הארץ. יתרה מזו, ניתן לבסס יחסים מספריים בין מה שחי כיום ובין מה שחי בעבר.

מספר גדול של מינים בני-זמננו מתייחסים למספר קטן של מינים שנכחדו, כאילו אפשר היה לייצג קשרי המשפחה ביו העבר להווה על-ידי קונוס, שקודקודו תקוע עמוק בתוך קרום כדור-הארץ. כאילו נטו הגופים החיים להתפצל במהלך הזמן, החל בתוכנית ארגון אחת, בטיפוס יחיד.

על־פי שתי קואורדינטות: האחת מתארת את תקופתו ואת בני זמנו; האחרת מציינת את טבעו ובמקרים מסוימים אפילו את דרך היווצרותו. ההווה מצוי בשורה התחתונה בלוח: הוא השכבה שעל שטח־הפנים של כדור־הארץ. בקצה האחר של הלוח, בחלק השייך לזמנים המרוחקים ביותר – כלומר, במעמקי האדמה – אין מוצאים שום עקבות לציון ראשיתן של הסדרות, שום סימנים שיקשרו את ההיסטוריה של התקופות הקדומות עם נוכחותם של יצורים מאורגנים. בין אם השרידים שמוצאים שייכים למשהו שהיה חי או שלא היה חי, הם מתארים תמיד את אותם אירועים של אותה היסטוריה. עולם־החי מייצג רק היבט אחד של כדור־הארץ ושל עברו.

אבולוציה

בהיסטוריה של הטבע, המאובנים מספרים על גיל הסלעים, ואילו שכבות המינרלים מתארות את תפוצתם, במרחב ובזמן, של המינים שחיו בעבר. לדעת לייל, כך לומד הגיאולוג,

אילו מינים חיו זה בצד זה ביבשה, במים מתוקים או במי ים בתקופות מסוימות בעבר; ולאחר שבדרך זו זוהו שכבות שנוצרו בים עם שכבות שנוצרו באותו זמן באגמים פנים־יבשתיים, אנו יכולים להתקדם צעד אחד קדימה, ולהוכיח שהולכי־על־ארבע או צמתי־מים מסוימים, שהתגלו במצב מאובן בתצורות אגמיות, איכלסו את כדור־הארץ באותה תקופה שבה חיו באוקיינוס דגים, זוחלים וזואופיטים מסוימים.⁴⁸

אולם בעטיה של סדרה של התפרצויות שהתרחשו על שטח־הפנים של כדור־הארץ, אותם מינים לא יכלו להתרבות ולהמשיך את קיומם במהלך כל ההיסטוריה של כדור־הארץ. במישור השיכוב האופקי של קרום כדור־הארץ, אותם טיפוסים של שרידים אורגניים אינם גפוצים על־פני שטחים נרחבים אלא מוגבלים לאזורים מוגדרים מסוימים. בדיקת התפוצה של היצורים על־פני כדור־הארץ כיום מראה, שהמקומות שניתן לאכלסם ביבשה ובים מתחלקים למספר רב של אזורים שונים, או 'מחוזות', שכל אחד

לכל אי היו כביכול הציפורים שלו. אך בין כל הציפורים הללו היה דמיון משפחתי, הן בינן לבין עצמן והן בינן לבין אלו שביבשת האמריקנית. הרי זה כאילו ההבדלים מתבלטים על רקע קווי־הדמיון, כאילו מיני הציפורים השונות האלה נגזרו כולם מהורה קדמון משותף, ואפייניהן האינדיבידואליים היו רק תוצאה של בידודן בטריטוריות הגיאוגרפיות שלהן.

המחקר הגיאוגרפי הגיע איפוא לאותה מסקנה כמו חקירת 'הארכיונים הפליאונטולוגיים': עם חלוף הזמן, מספר קטן של אורגניזמים דומים יוצרים מספר גדול של צאצאים שונים. וכל כמה שהצאצאים מתרחקים מהטיפוס המקורי, כן הם נוטים לחיות בנפרד ולהתרבות בינם לבין עצמם, ולפיכך הולכים ומעמיקים ההבדלים האלה. לדעת דארוין, צורות שונות, שבמרוצת השנים התחוללו בהן שינויים והן שונות מאוד זו מזו, עולות בדרגה ומצטרפות ל'שורת המינים'. בסופו של דבר, הופעתו של כל מין חדש נקבעת על־ידי שני משתנים: גודל אוכלוסיה, וקצב הופעת ההבדלים בין פרטים־יחידים באוכלוסיה. ראשית, גודל האוכלוסיה, שהרי הקבוצות הגדולות ביותר מתרבות מהר יותר: כל קבוצה עיקרית נוטה להוסיף ולגדול, וכך גם ליצור עוד תכונות אופייניות מובחנות מאוד זו מזו. שנית, הבדלים בין פרטים־יחידים, שהרי ככל שבני קבוצה מסוימת מתגוונים יותר בצורה, בתכונות ובהרגלים, כן הם מסוגלים להשתלט על בתי־גידול שונים ולהסתגל לחיות בהם. לקבוצות הגדולות ביותר יש האפשרות הרבה ביותר ליצור צורות שונות. לצורות השונות המובחנות ביותר הסיכוי הגדול ביותר למצוא בתי־גידול חדשים, להתיישב בהם, ועל־ידי גידול מספרי לדחוק את הצורות השונות המגוונות פחות. צאצאים חדשניים במין כלשהו מאפשרים לו לנצל ביעילות רבה יותר את משאבי סביבתו, בזכותה של מעין חלוקת־עבודה באיזור שפרטיו חיים בו. לדברי דארוין,

גטיה זו, הקיימת תמיד בקבוצות הגדולות, להוסיף ולגדול במספרן, ולהתבזר לפי תכונותיהן האופייניות, יחד עם האפשרות, שהיא כמעט בלתי־נמנעת, של הכחדה נרחבת, מסבירה את הסידור של כל הצורות החיות בקבוצות הכפופות זו לזו, כולן בתוך מחלקות גדולות ספורות,

יחס מעין זה מתגלה גם כשמשווים מינים דומים, או אפילו צורות שונות מאותו מין, החיים באזורים גיאולוגיים שונים. שהרי אם עולם-החי נוצר על-ידי התוצא של גורמים הפועלים בהווה, צריך שיהיה אפשר לראותם בפעולה בתנאים מסוימים. לחקירות שהובילו ישירות לניסוחה של תיאוריית האבולוציה היו שני היבטים: חקירת התפוצה הגיאוגרפית של המינים; וניתוח מדוקדק של הגורמים המתערבים ביצירת המינים. עם דארוין וואלאס הופיעו חוקרי-טבע מסוג חדש; חוקרים שאינם מסתפקים בעבודה במוזיאונים ובגנים זואולוגיים, אלא מסיירים בשטח, כמו הגיאולוגים, ובוחנים את חומר החקירה במקום האירוע. הם נדדו מאי לאי, מיבשת ליבשת, כדי ללמוד את היצורים החיים בסביבתם הטבעית, וכדי להשוות את המבנים שלהם, את בתי-גידול שלהם ואת מנהגיהם. הם צברו תצפיות, השוואות, מדידות. הם לא היססו לערוך ניסויים בשדה, להשקיע שבלולים בים לחמישה-עשר יום, כדי לבחון את יכולת ההישרדות שלהם, למשל, וכך לקבוע את האפשרות להעבירם מיבשת ליבשת. המסה העצומה של חומר שאספו איפשרה לנתח את הקירבה המשפחתית שבין היצורים, את הווריאציות שלהם בהקשר לתנאים הגיאוגרפיים, ואת נטייתם להתפזר או להיעלם. רשת שלמה של פעולות-גומלין הופיעה בהדרגה מתוך ההבדלים שתנאים גיאוגרפיים כפו על מינים שונים, על-ידי בידודם ועל-ידי האפשרות להעבירם ממקום למקום בדרך הים או בדרך האוויר. לפיכך, אין למצוא דוחיים או יונקים באיי האוקיינוס, אלא מופיעים שם מינים שאינם קיימים במקום אחר כלשהו על-פני כדור-הארץ, ומוצאים זיקה רבה בין המינים החיים באיים אלה ובין אלה החיים ביבשת הקרובה ביותר אליהם, אם כי מינים אלה אינם זהים. דארוין כתב, שבאיי גאלאפאגוס, למשל,

כמעט כל תוצר ביבשה ובמים נושא, באופן שאין לטעות בו, את חותם היבשת האמריקאית. יש שם עשרים-ושישה מינים של ציפורי יבשה, ועשרים-ושלושה מביניהם נחשבים... למינים נפרדים שנבראו, כך משערים, כאן; ובכל זאת הזיקה הרבה של מרבית הציפורים האלה למינים האמריקניים ניכרת בכל תכונה אופיינית, בהרגליהן, בתנועותיהן ובנימות קולן... ברור שאיי גאלאפאגוס אוכלסו על-ידי מתיישבים מאמריקה, שהגיעו לשם אם באמצעי תחבורה רגילים או דרך רצף יבשתי שהתקיים ביניהם בעבר.⁵¹

מהיעלמותן של צורות-ביניים. 'הכחדה רק הפרידה את הקבוצות זו מזו; היא בשום אופן לא יצרה אותן', אמר דארווין.⁵⁴ אם ציפורים נבדלות באופן בולט מחולייתנים אחרים, הרי זה מפני שנעלמו אין ספור צורות, שקישרו את אבותיהן הקדמונים לאלה של צורות אחרות. ולעומת זאת, נעלמו הרבה פחות צורות שקישרו בין דגים לדו-חיים: החלוקה כאן היא איפוא הרבה פחות חותכת. אחרי ככלות הכול, רק מספר קטן של המינים הקדומים יכלו להוליד צאצאים. מאחר שכל אלה שנוצרו מאותם מינים ראשוניים נחשבים למינים הנמנים עם אותה מחלקה, החטיבות של שתי הממלכות הגדולות, החי והצומח, מכילות, כל אחת, מספר קטן של מחלקות. באילן הגיניאלוגי נארגת רשת של קירבה משפחתית בין כל היצורים. החיבור בין שני אורגניזמים נמדד על-פי דרגת האתייגיות כביכול: 'כל סיווג אמיתי הוא גיניאלוגי', אמר דארווין. 'כלומר, שותפות המוצא היא הקשר הסמוי שחוקרי-הטבע חיפשו אחריו באופן לא-מודע, ולא איזו תוכנית בלתי-ידועה של בריאה, או הכרזה של השערות כלליות, או סתם חיבור והפרדה של מושאים הדומים פחות או יותר זה לזה.'⁵⁵

ההיבט השני של תיאוריית האבולוציה עוסק במגוונים הפועלים בעת הווריאציות של היצורים, בהתפתחות ארגונים ובהסתגלותם. האבולוציה מבוססת על שלושה עקרונות. ראשית, ובהתאם למה שהדגיש לייל, אי-אפשר להבחין בין הגורמים ששלטו באבולוציה של היצורים החיים בעבר ובין אלה הפועלים בהווה. אין צורך לחפש תופעות יוצאות מגדר הרגיל כדי להסביר את התהוותן של הצורות החיות השונות; אין צורך להעלות על הדעת מהפכים כלשהם שבעטים הוחלפו בעת ובעונה אחת כל היצורים. כפי שציין דארווין, קיימת 'הקבלה בולטת בחוקי החיים בזמן ובמרחב: החוקים ששלטו ברצף הצורות בעבר דומים כמעט לגמרי לחוקים השולטים כיום בהבדלים באזורים שונים'.⁵⁶ כל הצורות החיות בהווה השתלשלו מן הצורות שחיו בעבר. אין כל ספק שמעולם לא שובש רצף הדורות הנהוג היום, ולפיכך מעולם לא שיבשה שואה כללית כלשהי את סדר העולם כולו. כל השינויים אירעו בהדרגה, ללא טלטולים. לא הופיעו כל חידושים, אלא הצורות הלכו והתגונו רק על-ידי ביזור ובידוד. הטרנספורמציה של מין אחד למין אחר

שאותן אנו רואים עתה בכל מקום סביבנו, ואשר הוסיפו להתקיים בכל הזמנים.⁵²

כל זה בא לידי ביטוי במונחים 'ביזור', 'התגוננות' ו'פיזור'. מעתה כבר לא ניתן היה לייצג את רצף הצורות החיות לאורך זמן בלוח בעל עמודה אחת, או אפילו בן כמה עמודות מקבילות, המתאימות לסדרות עצמאיות; האיור היחידי היכול לתאר את התגוננותה של קבוצה הוא אילן גיניאלוגי.

כשם שניצנים גדלים ומצמיחים ניצנים חדשים, ואלה, אם הם חזקים דים, מסתעפים לענפים ומקיפים מכל עבר את הענפים החלושים יותר, כך אירע, אני מאמין, על־ידי גנרציה, באילן־החיים הגדול, שענפיו המתים והשבורים ממלאים את קרום כדור־הארץ, ואילו הסתעפויותיו הענפות והיפות מכסות את שטח־פניו.⁵³

ביזור התכונות האופייניות, יחד עם שימור המאפיינים המשותפים באמצעות תורשה, מסביר את הזיקות הקושרות את כל חבריה של אותה משפחה, או אפילו של קבוצת השתייכות גבוהה יותר. באותה משפחה, שהשתלשלה מהורה קדמון משותף, אך התחלקה למספר קבוצות מובחנות, תכונות אופייניות המועברות בה הולכות ומשתנות עם הזמן. באופן זה, כל המינים במשפחה זו קשורים יחד על־ידי 'קווי־זיקה עקיפים בני אורך שונה, המוליכים אחורה לתוך העבר דרך מספר גדול של הורים קדמונים'. אם ממשיכים בדרך זו, צעד אחר צעד, ניתן לסדר את כל עולם־החי לאורך ענפיו של אותו אילן גיניאלוגי. כל היצורים, אלה שחיו לפני זמן רב או אלה החיים בהווה, יכולים להשתלשל ממספר קטן מאוד של הורים קדמונים, או אפילו מהורה קדמון יחיד. מוצא היצורים, 'שחר החיים', נעלם במעמקי הזמן. אפשר להעלות השערות על־אודותיו, שכן כמו שורש של עץ, תודו של הקונוס קבור עמוק בקרום האדמה. מוצא זה מצטמצם למספר קטן של יצורים מאורגנים, 'שהיתה להם רק הצורה האלמנטרית ביותר', ואשר בהם נמחק כל מה שהוא נבדל ומיוחד במינו.

החלוקות המובחנות זו מזו, הנצפות בעולם־החי, נובעות

גורלו של כל פרטייחיד שחי בקרב היצורים בעבר, גם אז לא יהיה אפשר להסיק ממנו על חוקי הווריאציות והאבולוציה. מושא הטרנספורמציה איננו אורגניזם אחד, אלא קבוצה של אורגניזמים דומים שחיו במשך הזמן. בכל כתביו מדגיש דארווין שוב ושוב, כמה עצום מספרם של היצורים המאורגנים, מה רב ההרס, וכמה בלתי-יעילים הם המגנגונים השולטים על ההפְּרָיָה וההתרבות. שהרי מבין מיליארדי תאי הזרע, רק אחד בלבד מצליח לשחק את תפקידו. בקיצור, בכל מקום מודגש הבזבוז העצום הזה של הטבע, שבגללו, אחרי ככלות הכול, נופלות בחלקם של האירועים הנדירים ביותר התוצאות החשובות ביותר. לפני בולצמן ולפני גיבס, כבר אימץ דארווין את התפישה שהמכניקה הסטטיסטית עתידה היתה להציע במחצית השניה של המאה ה-19 בחקר ההתנהגות של המולקולות. כל תיאוריית האבולוציה מבוססת על חוקי המספרים הגדולים. אם כי דארווין לא השתמש בשיטות מתמטיות מורכבות לגיתוח הווריאציות באוכלוסיה: הוא הסתמך על אינטואיציה ושכל ישר. כשחשב על תמורות, הוא התייחס רק לתנודות המופיעות תמיד באוכלוסיות גדולות, מה שהסטטיסטיקאים מכנים בשם 'זנבות של עקומות התפלגות'. עמדתו כבר היתה עמדת הניתוח הסטטיסטי, שלפיה היתרון הקטן, שגידול מזערי בסיכויי ההישרדות וההתרבות מעניק לפרטים מעטים, הופך להיות למגננון נוקשה בעל תוצאות מחויבות-המציאות. הכורח לא נעלם איפוא כליל מעולם-החוי. הוא רק שינה את טבעו.

הדחף העיקרי לטרנספורמציה של צורות חיות צריך היה איפוא להימצא בעצם התהליך היוצר אוכלוסיות גדולות – כלומר, יכולת ההתרבות, שהיא יכולת המיוחדת ליצורים חיים. מעתה כבר אין דחיפה מתמשכת, פשוטה ויחודית ליצור צורות חדשות במהלך הזמן. הופעתם של היצורים מייצגת את התוצא של מאבק ממושך בין פעולות מנוגדות, התוצאה של כוחות יריבים, הגֶמֶר של קונפליקט בין האורגניזם לסביבתו. אולם בפרשה זו, המלה הראשונה נתונה תמיד לאורגניזם. הסביבה רק משיבה. לדעת דארווין, 'אין זה סביר' להאמין, שרגלי האווזים פיתחו קרום שחיה אך ורק משום שהם חותרים ברגליהם במים; 'אבסורד' לחשוב, שזוחלים איבדו את רגליהם רק משום שניסו לזחול טוב יותר.

מייצגת רק את סכום השינויים הקטנים בסדרה של דורות רצופים במהלך ההסתגלות. האבולוציה מתקדמת 'בצעדים קטנים' ו'לעולם איננה יכולה לבצע קפיצה פתאומית'. את רציפות היצורים החיים החליפה הצמיחה של האילן הגיניאלוגי; צמיחה איטית, עקשנית ובלתי־מתפשרת.

כתוצאה מכך נדחה לגמרי הרעיון של כורח בעולם־החי, של הרמוניה הכופה מערכת קשרים בין היצורים. המסמכים הפליאונטולוגיים, התפוצה הגיאוגרפית של המינים, התפתחות העוברים, תופעות הביזור של תכונות אופייניות הבאות מהורה קדמון משותף, הגידול שחל בקבוצות מסוימות וההיעלמות של אחרות – כל אלה מצביעים על האקראיות של היצורים החיים ושל היווצרותם. שום תוכנית שנהגתה מראש, אם תוכנית שבוצעה 'במכה אחת' בבריאה, או הוצאה אל הפועל בהדרגה בתמורות רצופות, אינה יכולה להסביר את הצורות שאיכלסו ועדיין מאכלסות את כדור־הארץ, וגם לא את תפוצתן. לדעת דארוין, 'אין שום הופעה פתאומית של איברים חדשים, שנוצרו כמדומה באופן מיוחד למטרה מסוימת'. הופעה של צורה חדשה איננה בלתי־נמנעת. היא תוצאה של כוחות רבים לאין ספור, שהתאחדו בתקופה מסוימת במקום מסוים. אילו היו התנאים שונים, עולם־החי בימינו היה שונה, או אולי אף לא היה עולם־חי כלל. על־ידי גירוש שד־הכורח, תיאוריית האבולוציה שיחררה את עולם־החי מכל טרנסצנדנציה, מכל גורם שסיבתו נמצאת מעבר לידיעה. לא נשאר דבר אשר יכול היה לחסום, בעצם מהותו, את המחקר ואת הניסוי.

ולבסוף, המהפך הקיצוני מכול שחולל דארוין בעמדה כלפי עולם־החי היה מיקוד תשומת־הלב באוכלוסיות גדולות ולא בפרטים־יחידים. עד אז, הווריאציות שעשויות היו להופיע ביצור מסוים שימשו אמת־מידה לתיאור טיפוסי הטרנספורמציות שהאורגניזם עשוי להיחשף להן. בעקבות דארוין, אבד כליל העניין בכשלים ובאסונות העלולים לקרות לפרט־יחיד זה או אחר. ברור שאין שום סיכוי למצוא ביום מן הימים את עקבותיו של כל בעל־חיים שחי אי־פעם על־פני כדור־הארץ. אך גם אם ניתן היה לשחזר את

מה גדול הפער בין תיאוריה זו ובין כל מה שקדם לה. היוצא מן הכלל היחידי הוא מאלתוס, אשר לו ייחסו דארוין וגם ואלאס את רעיון שיוויי-המשקל באוכלוסיות, העימות בין שני כוחות מנוגדים: אחד הטבוע ביצורים עצמם; השני היצוני להם – לוויות האבולוציה. וכך, כדי לבנות תיאוריית אבולוציה, הביולוגיה שאלה מודל מהסוציולוגיה. אך מודל זה עצמו היה מבוסס על היציבות במספר הפרטים היחידים במין אחד, שכבר בופון הבחין בה. 'הגורם שאני מתכוון לו', אמר מאלתוס, 'הוא הנטיה הקיימת תמיד בכל היצורים החיים לגדול מעבר למה שמאפשרת התזונה המזומנת להם. בכל ממלכות החי והצומח הפיץ הטבע את זרעי החיים לכל עבר, בשפע רב וביד נדיבה; אך הוא היה חסכוני למדי בשטח ובתזונה הנחוצים לגידולם.⁵⁸ לדעת מאלתוס, התפתחות אוכלוסיות האדם היתה כפופה לפעולתם של שני גורמים הפועלים בדרכים מנוגדות: מצד אחד, 'ריבוי בטור גיאומטרי'; מצד אחר, מכשולים ייצוניים כמו הרס, מלחמות, מגפות, מחסור במזון; בקצרה, כל המגבלות המשפיעות בהכרח על ההתפשטות, במיוחד העובדה ש'אמצעי הקיום' עצמם אינם יכולים לגדול באותו קצב, אלא במקרה הטוב רק בטור אריתמטי. מכאן מתעורר קונפליקט, שבחברות האדם מביא ל'מלחמת-קיום', שבה ראה מאלתוס סיבה ומסובב גם יחד של השינויים החברתיים שהתחוללו עם בוא העידן התעשייתי. אולם כשאימצה תיאוריית האבולוציה את רעיון מלחמת-הקיום, היה זה במובן שונה במקצת. בגלל היפוך מזור של הדברים, נעשה לעתים קרובות שימוש באבולוציה הביולוגית כדוגמה ראשונה במעלה לתחרות הוויטלית, לנצחון החזקים על החלשים, של אדונים על עבדים, כדי למצוא בה בסיס טבעי לאי-שוויון חברתי או גזעי וכדי להצדיק את פעולותיהם המופרזות והגרועות ביותר. למעשה, ואלאס, ויותר ממנו דארוין, שאלו מתורת מאלתוס בעיקר את הרעיון על הניגוד בין יכולת ההתרבות של היצורים ובין הכוחות הייצוניים המגבילים אותה.

כמופרטואי לפניו, דארוין שאף למצוא בתהליך הברירה המלאכותית, כפי שהוא נעשה בחיות מבויתות ובצמחי-תרבות, מודל שניתן ליישמו לטבע. שהרי יצירה של מינים חדשים על-ידי מטפחים, המכליאים בעלי-חיים וצמחים, היא תוצאה של

יכולתם של היצורים לשנות את צורתם, תכונותיהם והרגליהם טבועה בחי. זוהי אחת האיכויות המבדילות יצורים מדברים דוממים. היא קשורה ללא הפרד ליכולת האופיינית ביותר של היצורים החיים: יכולתם להתרבות. היא פשוט הביטוי של המימרה הישנה 'פרו ורבו'. מעצם טבעו, כל אורגניזם (או כל זוג של אורגניזמים) ניתן ביכולת ליצור צאצאים, שמספרם הולך וגדל מדור לדור. אילו התקיים על-פני כדור-הארץ רק מין אחד, שדבר איננו מגביל את התפשטותו ודבר איננו הורס אותו, הוא היה מוכפל לעולם ועד בטור גיאומטרי. 'אפילו בעלי-החיים הפוריים פחות מכול היו מתרבים במהירות אילמלא עצרו בעדם', אמר ואלאס.⁵⁷ כבר ליניאוס חישב, שאם צמח עונתי וכל אחד מצאצאיו יצמיחו רק שני זרעים בשנה – וכידוע, אין שום צמח בלתי-פורה מעין זה – אזי בתוך עשרים שנה יהיו למעלה ממיליון צמחים כאלה. דארוין ערך חישוב דומה בפילים, הנחשבים לבעלי-החיים המתרבים באיטיות רבה משאר בעלי-החיים הידועים: בהנחה שפיל מתחיל ברביה רק כאשר הוא מגיע לגיל שלושים, שהוא תי מאה שנה ומביא לעולם שישה צאצאים בפרק-זמן זה, אזי, לאחר 750 שנה, צאצאיהם של זוג פילים ימנו 19 מיליון בערך. ואילו אצל האדם, שמספרו מוכפל כל עשרים וחמש שנה, בקצב זה לאחר אלף שנה פשוט לא יישאר לכל צאצאיהם של זוג אחד די מקום לעמוד זה בצד זה על פני כדור-הארץ. אך שום מין איננו חי לבדו על כדור-הארץ. בכל זמן נתון חיות אוכלוסיות של אורגניזמים שונים, המתחרות זו בזו על טריטוריה, מזון ואור; בקיצור, על עצם קיומן. השפעת הסביבה מוגבלת איפוא להעדפת ההתרבות של מינים מסוימים על חשבון מינים אחרים. יש הנידונים להיעלם, אחרים להתפשט. אולם אם כל המינים יכולים להתרבות, אם כולם יכולים ליצור יצורים רבים יותר בקצב גובר והולך, הרי צאצאים אלה הם בדרך-כלל כמעט זהים, אם כי לא לגמרי, לטיפוס הראשוני. ברגע שהופיעו, הצורות החדשות נוטלות חלק בתחרות. ההתרבות קובעת אם הן מנצחות או מפסידות: באיזו מידה השוני ביניהן לבין אבותיהן מעודד את ההתרבות. מכאן ההחלפה ההדרגתית של מינים מסוימים במינים אחרים, המותאמים יותר להתרבות בתנאים מסוימים. בסופו של דבר, הכוח היחיד המיוחד לאבולוציה של עולם-החי הוא יכולת ההתרבות המיוחדת ליצורים.

לחלוף הזמן יש חשיבות רק אם – וחשיבותו במובן זה היא רבה – הוא נותן סיכוי טוב יותר להופעתן של וריאציות מועילות, לברירתן, לגידול במספרן ולהיקבעותן ביחס לתנאי־החיים האורגניים והאי־אורגניים המשתנים לאט.⁶¹

מעולם לפני־כן לא נמדד זמן על־פי דורות. אם כן, למעשה, דור מייצג את היחידה המתאימה ביותר להערכת הזמן הדרוש להופעת צורות חדשות בתקופות הגיאולוגיות. באילן הגיניאלוגי, שדארוין שירטט כדי לייצג את עולם־החי, מופיע ענף חדש כאשר מידת הצבירה של וריאציה די בה כדי לאפיין צורה שונה מוגדרת היטב, כפי שמוצג בכל ספר העוסק בזואולוגיה סיסטמטית. המרווחים בין שני ענפים 'עשויים לייצג אלף דורות או עשרת אלפי דורות'.⁶²

תהליכי הברירה הטבעית דומים לתהליכי הברירה המלאכותית, אולם תוצאהיהם רבים לאין שיעור. שהרי המטפח יכול לבחור רק תכונות אופייניות גראות, בהתאם לטעמו ולצרכיו, ואילו הטבע יכול לפעול גם על איברים פנימיים, על עצם הרכבם של היצורים החיים ועל הארגון כולו.

אפשר לומר על דרך המטפורה, שהברירה הטבעית היא בחינה דקדקנית של הווריאציות המזעריות, הנערכת מדי שעה בשעה ומדי יום ביומו ברחבי העולם; דחיית הווריאציות הרעות, שימורן וחיבורן של כל הטובות; הברירה הטבעית פועלת בשקט ובאין רואה, בכל זמן ובכל מקום שמופיעה הזדמנות, לשיפורו של כל יצור אורגני ביחס לתנאי חייו האורגניים והאי־אורגניים.⁶³

המאבק להישרדות של פרטים־יחידים הוא, מעל לכול, מאבק לשם רביה. פרטים אלה נבחרים באופן מתמיד ואוטומטי לבדיקת יכולת ההתרבות שלהם בתנאי קיום מסוימים וליצירת צאצאים היכולים לחיות בטריטוריות מסוימות. הברירה פועלת גם בתופעות המיניות: המאבק בין כמה זכרים לבעלות על נקבות מסתיים בכך שלזכר החזק והערמומי ביותר יש צאצאים רבים יותר.

כשיש דמיון בהרגלים הכלליים בקרב זכרים ונקבות של בעלי־חיים כלשהו, אך הם נבדלים זה מזה בתצורה, בצבע ובקישוט – הבדלים אלה נגרמו

פעולת־הגומלין בין שני סוגי אירועים: מצד אחד, הנטיה של היצורים החיים להתרבות ולהתגוון באופן טבעי; מצד אחר, מאמציהם של המטפחים לפתח בעדרים או בצומח את הצורות המסוימות שיש להם עניין מיוחד בהן. לא האדם עצמו הוא הפועל ישירות על ההשתנות. השינויים מופיעים רק 'לפעמים', מבלי שנדע איך ליצור אותם. הם מופיעים ללא סיבה, כביכול, ואינם קשורים כלל לצורך או לדרישה, ולו הקטנים ביותר, של האורגניזם. כך, לדעת דארווין, 'הסיכוי להופעתם יגדל מאוד ככל שיגדל מספרם של הפרטים־היחידים; לפיכך, ממדי האוכלוסיות הם תנאי חשוב להצלחה'.⁵⁹ ואולם, אף־על־פי שהטבע ולא המטפח הוא היוצר את ההשתנות, המטפח יכול לבחור מבין הווריאציות שסיפק לו הטבע, ולהתאים את בעלי־החיים לפי מה שהוא עצמו תיכנן. משעה שהופיעה וריאציה בפרט־יחיד, היא משתמרת על־ידי תורשה בצאצאיו. די איפוא בהבדלים אינדיבידואליים פשוטים, כדי לאפשר הצטברות של שינויים בכיוון הרצוי. האדם יכול לברור, באופן שיטתי או אפילו באופן לא־מודע, בכך שישמור בכל דור את כל הפרטים־היחידים המועילים או הנעימים לו ביותר. במתן תנאים רצויים לאורגניזמים, בחירה שיטתית של הבדלים אינדיבידואליים מסוימים – לפעמים כה קטנים, עד שהם חומקים מעין בלתי־מאומנת – ומיקוד ההתרבות באורגניזמים אלה בלבד, ניתן לשנות כל תכונה אופיינית שהיא בבעל־החיים או בצמח.

לדעת דארווין, ניתן ליישם מודל זה של ברירה מלאכותית בצורה של 'ברירה טבעית' לתופעות הווריאציות והאבולוציה בטבע.

את השימור של הווריאציות המועילות ואת הדחיה של הווריאציות המזיקות אני מכנה בשם ברירה טבעית, או הישרדות המותאמים ביותר. הווריאציות שאינן מועילות וגם אינן מזיקות לא יושפעו על־ידי ברירה טבעית, אלא יישארו כמרכיב צף.⁶⁰

ההשתנות מופיעה באופן ספונטני במהלך הדורות, בטבע וגם בהכלאה על־ידי המטפחים. בשני המקרים, גודל האוכלוסיות ממלא תפקיד חשוב, בכך שהוא מאפשר לווריאציות להופיע. וכאן נכנס גורם הזמן. למשך הזמן כשהוא לעצמו אין כל השפעה על ברירה טבעית.

על היצורים המאורגנים. הכורח, ששלט בעולם־החי בן־הזמן, הוחלף באקראיות, שכבר שלטה בשמים ובדברים הדוממים. עולם־החי לא רק עשוי היה להיות שונה לחלוטין, אלא באותה מידה גם עשוי היה שלא להתקיים כלל. האורגניזמים נעשו עתה יסודותיה של מערכת עצומה מסדר גבוה יותר, המקיפה את כדור־הארץ ואת כל המושאים המצויים בו. צורתם של היצורים, סגולותיהם, ותכונותיהם האופייניות היו כפופים איפוא לניטור פנימי של המערכת – כלומר, כפופים לפעולות־הגומלין המתאמות את פעילותם של יסודות המערכת.

לפנינו איפוא מהפכה בהשקפה ולא רק המשך של דרך־המחשבה הטרנספורמיסטית, שבפון ולאמארק היו מחולליה. מהפכה זו שיקפה את השינוי שחל בעצם דרך ההתבוננות במושאי המחקר; היא היתה תוצאה של עמדה חדשה לגמרי, שהופיעה באמצע המאה ה-19. שינוי זה לא היה מקרי, ועל כך מעידה הופעתו הבלתי־תלויה, פחות או יותר בו־בזמן, בתחומים שונים ביותר: בחקר החומר עם בולצמן וגיבס, כמו גם בחקר היצורים החיים עם דארווין, ואלאס ומאוחר יותר מנדל. למעשה, יש שתי דרכים להתבונן באוסף של מושאים מאותו סוג, כמו מולקולות של גז, או אורגניזמים בני אותו מין. מצד אחד, אפשר לראותם כקבוצה של גופים זהים, שכל אחד מהם הוא עותק אמיתי של אותו מודל. בעולם־החי, סיווג הצורות נעשה איפוא לפי המבנה המנוצח ברצף הדורות, כלומר, קביעותו של הטיפוס. לפיכך, אין כל צורך לדעת את המושאים עצמם, אלא את הטיפוס שהם מייצגים. רק לטיפוס יש ממשות. המושאים רק משקפים את הטיפוס. אין זה חשוב אם העותקים שונים לפעמים מהמודל. גם אם יש סטיות מהטיפוס, אין מדובר אלא בכמויות מזעריות, בפגמים חסרי־חשיבות. ולהיפך, אפשר לראות את אוסף המושאים האלה כאוכלוסיה של פרטים־יחידים, שלעולם אינם זהים. לכל חבר בקבוצה יש אופי יחודי. כבר אין מודל שכל הפרטים־היחידים תואמים לו בדיוק, אלא דיוקן־רובוט, שרק מסכם את ממוצע תכונותיו של כל פרט־יחיד. לפיכך צריך להכיר את האוכלוסיה ואת תפוצתה בשלמותה. הטיפוס הממוצע איננו אלא הפשטה. רק לפרטים־היחידים יש ממשות, למאפייניהם היחודיים, להבדלים ביניהם ולווריאציות שלהם.

בעיקר עלידי ברירה מינית: כלומר, לזכרים מסוימים באוכלוסיה היה בדורות רצופים יתרון מזערי כלשהו על פני זכרים אחרים – אמצעי תקיפה, אמצעי הגנה או משיכה – ואת היתרונות האלה הם העבירו לצאצאיהם הזכרים.⁶⁴

היתרון פעוט־הערך ביותר שעשוי להיות לאורגניזם על פני יריבי מקרב בני־מינו מטה את כף־המאזניים לטובתו. השינוי המזערי ביעילות הרבייה, די בו כדי לשנות את מאזן האוכלוסיה. שיפורים מסוימים מאפשרים לכמה פרטים יחידים להתרבות טוב יותר ומהר יותר מאחרים. פרטים אלה נוטים לגדול במספרם, ואילו האחרים נוטים להיעלם. מאחר שרוב הווריאציות מועברות בתורשה, שינויים מועילים מצטברים באופן טבעי מדור לדור, ואילו האחרים נעלמים. לדעת ואלאס,

לכל הסטיות מהצורה הטיפוסית יש השפעה מוגדרת, גם אם היא מיוערת, על הרגליהם או כישוריהם של הפרטים... אם מין כלשהו יפתח צורה הניתנה בכוחות מוגברים במקצת לשמר את קיומה, בחלוף הזמן אותה צורה תרכוש עדיפות מספרית.⁶⁵

היום, כמו אתמול, האבולוציה ממשיכה בפעולתה כדי לקיים, לתקן ולשפר את הסתגלות בעלי־החיים והצמחים לסביבתם. הברירה הטבעית פועלת באמצעות התרבות דיפרנציאלית.

*

עד אמצע המאה ה-19 נחשב עולם־החי למערכת המנוטרת מבחוץ. יצורים מאורגנים, בין שהיו קבועים מאז הבריאה ובין שהלכו והתפתחו ברצף אירועים, היו ערוכים תמיד בסדרת צורות רציפה. אם שברים לכאורה מתגלים לנו בהירארכיה, הרי זה בגלל השמטה, בורות או רישום לוקה בחסר. המבנה הקיים של עולם־החי ביטא איפוא כורח טרנסצנדנטי. שכן באותם ימים לא העלו על הדעת, שיצורים חיים היו בעבר שונים משהם בהווה, או שצורות אחרות עשויות לאכלס בעתיד את כדור־הארץ. עם תיאוריית האבולוציה נעלם הרעיון בדבר הרמוניה קבועה מראש, האוכפת מערכת יחסים

לתוצאה. רק אחרי שהופיע יצור חדש, הוא מעומת עם תנאי הקיום. רק משעה שהם חיים, כל המועמדים להתרבות ניגשים למבחן.

כבר במאה ה-18 העלו בופון, מופרטואי ודידרו את האפשרות שהיצורים המאורגנים ממוינים ונבררים לאתר שנוצרו. מפלצות יכלו להיווצר, אך מאחר שלא יכלו להוסיף ולחיות, חייבות היו להיעלם. הטבע סרק, כביכול, את הצורות החיות שכבר נוצרו, השאיר בחיים רק את אלה שהיו מצוידות באמצעי חיות ודחה את מה שהיה בלתי־מוגמר: את זה שלא יכול היה להיזון, בגלל העדר פה, למשל; או את זה שהיה חסר יכולת להתרבות, בגלל העדר איברי־רבייה, למשל, ועוד. אולם מפלצות מעין אלה אפשר היה להעלות על הדעת רק בהקשר למשחק־הגומלין בין מולקולות אורגניות. כל מה שהוא אפשרי אפריורי במערכת־המצורפת ימומש, אך רק צירופים מסוימים יהיו בני־קיום. באמצע המאה ה-19 היה המצב שונה לגמרי. את שיווי־המשקל של עולם־החי קבעה מעין דיאלקטיקה בין קביעות לווריאציות, בין זהות לשוני. דארוין השתמש במושג 'ברירה' בהקשר לאבולוציה כשערך אנלוגיה עם הכלאות של המטפחים, ונתקל לעתים בביקורת. שכן רעיון הבחירה קשור לכוונה, המובילה את המכליא למיין את המצאי שלפניו ולברור את הצורות המתאימות ביותר למטרתו. גם בטבע נעשה מיון, אך הוא אוטומטי. כל דבר העשוי להפריע להתרבות בדרך כלשהי, משנה אותה. בין המועמדים לרבייה, אין שום כוונה המדריכה את בחירת המועמד, אלא היא נעשית אפוסטריורי על שולחן הניסויים, ונובעת רק מן האיכויות והביצועים של הפרטים־היחידים. ההסתגלות הופכת לתוצאה של משחק־גומלין מורכב בין אורגניזמים לסביבתם. אף־על־פי שיכולת ההתרבות היא איכות הטבעה באורגניזם, מימושה קשור הדוקות בכל משתני הסביבה. אורגניזם 'בוחר' בסביבתו בדיוק כשם שהסביבה בוחרת באורגניזם. בתהליך ההסתגלות, רבייה פועלת רק כמגבר. היא רק מדגישה את הסטיות המופיעות באופן ספונטני. על־ידי משיכה מתמדת בכיוון אחד, הרבייה יכולה לגרום בסופו של דבר לסחיפת אוכלוסיות לאורך נתיבים מוגדרים היטב. מאחר שהווריאציות מתרחשות באופן עיוור, הן פונות לכיוון שקובע תהליך המיון חסר־הרחמים של הברירה הטבעית. לדעת דארוין, מרגע לידתו

מדובר איפוא בהתנגשות בין שתי דרכי התבוננות בטבע ובמושאי, בכל הסוגיות. המעבר מהראשונה לשנייה הוא שציין את ראשיתה של המחשבה המדעית המודרנית. בחקר עולם־הדומם התבטאה העמדה החדשה בהופעת המכניקה הסטטיסטית. בעולם־החי, היא היתה תנאי מקדים הכרחי להופעת תיאוריית האבולוציה. הווריאציות כבר לא היתה בעיה של פרטים־יחידים, אלא של אוכלוסיות. אף־על־פי שדארווין לא השתמש בניתוח סטטיסטי, אלא השיג אוכלוסיות באופן סטטיסטי. ראשית, מפני שהווריאציות רק ביטאו את תגודות ההתפלגויות הטבעות בכל מערכת; שנית, מפני שפעולתה של הברירה משנה באיטיות את שיווי־המשקל באוכלוסיות באמצעות פעולת־גומלין מקרית בין האורגניזמים לסביבתם. עם נקודת־מבט חדשה זו נעלם הקושי העיקרי להסביר כיצד התרחשו הטורנספורמציות ביצורים. מעתה, כדי להסביר שינויי צורה, לא היה צורך להסתמך עוד על מנגנון מסובך, על איזו כוונה של הטבע, או על איזו השפעה של הסביבה.

מעתה כבר אין טוענים, שכל פרט־יחיד של מין כלשהו צריך להיות זהה לאחרים. אלא בכל דור מתנסה כל תכונה אופיינית בסדרה רציפה של סטיות קטנות מהממוצע. רק אחר־כך נכנסת לפעולה ההסתגלות, בגלל עצם העובדה שכל אורגניזם המופיע על כדור־הארץ עומד מיד למבחן החיים וההתרבות. תיאוריית האבולוציה מאופיינת איפוא על־ידי הדרך שבה נבחנת הופעת היצורים החיים ולהיטותם לחיות ולהסתגל לעולם הסובב אותם. לדעת לאמארק, כשנוצר יצור חדש, מקומו כבר היה מסומן בשרשרת היצורים, המטפסת מעלה מעלה. הוא צריך היה לייצג מראש שכלול, התקדמות בהשוואה למה שכבר היה קיים. הכיוון, אם כי לא הכוונה, קדם למימוש. אצל דארווין התהפך סדר זה: היווצרותו של יצור קדמה להסתגלותו. הטבע העדיף רק את מה שכבר קיים. המימוש קדם לקביעת ערכו של מה שמומש. שינוי מכל סוג שהוא עשוי להתרחש כתוצאה מהתרבות. אין זה משנה איזו וריאציה מופיעה, הן משופרת והן גרועה, בהשוואה למה שכבר קיים. אין כל דואליות בדרך שהטבע יוצר חידושים, שום דבר שהוא בגדר התקדמות או נסיגה, טוב או רע, מוצלת יותר או גרוע יותר. הווריאציה מופיעה במקרה, כלומר, ללא שום קשר בין גורם

מסתברים מעבודתו. אם כן, הרביה מעצבת צורות זהות וגם צורות שונות. בגלל סדירותה הילד נולד בדמות הוריו. בגלל תנודותיה נוצרים חידושים. היצורים נולדים, עם שינויים ובלעדיהם. ואז הם עומדים למשפט – הם נשפטים על-ידי הארץ שהם חיים בה ועל-ידי היצורים הנמצאים מסביבם; על-ידי אלה שאותם הם צדים ואלה הצדים אותם; על-ידי בני אותו הזווית (sex) ובני הזווית האחר. גזר-הדין הוא סופי, אין לערער עליו; הוא נמדד לפי מספר הצאצאים. קל איפוא להבין מדוע מכאן ואילך היתה לרביה של היצורים חשיבות עצומה. היא נעשתה הגורם העיקרי הפועל בעולם-החי, מקור היציבות והווריאציות כאחד, התהליך שבמהלכו התקיימו והתגונו מביניהם, תכונותיהם, איכויותיהם וסגולותיהם של היצורים. הרביה היתה לנקודת-המיפגש בין דטרמיניזם, שהיה אחראי להיווצרותן של צורות דומות, ובין אקראיות, שהיתה אחראית להופעתן של צורות חדשות. שכן, עם תיאוריית האבולוציה שינה הכורח הן את טבעו והן את מטרתו בעולם-החי. כשיישמו כורח להתנהגותן של אוכלוסיות עצומות, הוא הפך למה שהניתוח הסטטיסטי עתיד היה להחשיב כביטוי של חוקי המספרים הגדולים. אך הוא כבר לא שיקף את התוצאים של כוח בלתי-מובן שכפה את התצורה של עולם-החי בן-הזמן. כל עוד הצורות החיות היו מחוברו כולן על-ידי מערכת של קשרים הכרחיים, אפריורי, גיזרה שלמה של עולם-החי לא נכללה, בגלל מהותה, בחקירה ובניסוי. הביולוג שניצב לפני ממלכה בלתי-נגישה זו דמה לילד המדביק את אפו לחלון של חנות עוגות ונועץ מבט במטעמים האסורים. אולם משעה שצומצם הכורח רק לתוצאים של ברירה, המחייבת לחיות בתנאים מסוימים, באזורים מסוימים ובין יצורים מסוימים, געלם הבלתי-נגיש. אם שום כוונה איננה מיוחסת להופעת צורות חדשות, משמע שהצלחתן או כשלונן ב'מלחמת-הקיום' תלויים אך ורק בגורמים פיסיקליים, כלומר, בפרמטרים בוי-שינוי. עתה לא נשארה שום גיזרה שמורה, בלתי-נגישה, בביולוגיה. מעתה, אפילו הרביה יכולה להיעשות מושא המחקר.

נעשה כל יצור חי חלק ממערכת מאורגנת עצומה, המורכבת מכדור-הארץ וכל מה שמצוי עליו. הברירה הטבעית מייצגת גורם מנטר, המקיים את ההרמוניה של המערכת. היום אנחנו סבורים, שמערכת מעין זו יכולה לשרוד רק אם לולאות ה'משוב', ההיזון החוזר, מכווננות את פעולתה באופן אוטומטי. באופן זה נעשית האבולוציה תוצאה של המשוב מהסביבה לרביה.

הברירה הטבעית פועלת באיטיות, ובשלבים. הזמן האבולוציוני הוא בלתי-הפיך, שלא כמו הזמן שעדיין פעל בפיסיקה. במכניקה הגניוטונית לא היה למעשה כיוון מועדף בפעולת-הגומלין שבין שני גופים. התרמודינמיקה הסטטיסטית במחצית השנייה של המאה ה-19 היא שהכניסה את מושג חץ-הזמן לפיסיקה, בכך שגרמה לאוכלוסיות של מולקולות לעבור ממצב סביר פחות למצב סביר יותר, כלומר, מסדר לאי-סדר. אולם בתיאוריית האבולוציה, הזמן בעולם-החי כבר היה תד-כיווני: מהרגע שהיצורים מובלים לאורך נתיב מסוים על-ידי וריאציות וברירה, אין הם יכולים לפנות אחורה. הברירה הטבעית מאלצת אותם להמשיך ולהתמייין בדרך שנקבעה, או להיעלם. לדעת דארווין, בתנאים שאכפו החיים על כדור-הארץ, התוצאה של ברירה טבעית 'היא שכל נברא נוטה להשתפר עוד ועוד ביחס לתנאיו. השיפור מוביל בהכרח להתקדמות הדרגתית של הארגון של מספר גדול ביותר של יצורים חיים בכל העולם.⁶⁶ בכל שלב בסדרה יש רק הסתברות נמוכה ביותר של חזרה למצב מוקדם יותר. הסיכוי לשחזר אי-פעם את הנתיב בשלמותו הוא איפוא אפסי. על עיקרון זה אפשר לבסס תיאוריה כללית של אבולוציה של מערכות מאורגנות, חיות ושאינן חיות. מורכבות גדלה והולכת במהלך הזמן, ואי-הפיכות של סדרות של טרנספורמציות נעשות תכונות הטבועות במערכות כאלו. מה שקרוי התקדמות, או הסתגלות, איננה אלא התוצאה ההכרחית של המשחק הבלתי-נמנע של פעולת-הגומלין בין המערכת למה שמצוי סביבה.

באמצע המאה ה-19, הרעיונות על התורשה עדיין היו מעורפלים מאוד. אך לפי תיאוריית האבולוציה, מה שנברר רכש את קביעות התורשה, את הדברים האלה אמנם לא ניסח דארווין עצמו, אך הם

הגן

באמצע המאה ה-19 הסתמנה נקודת-מפנה בביולוגיה. בתוך פחות מעשרים שנה הופיעו תיאוריית התא בצורתה הסופית, תיאוריית האבולוציה, האגליזה הכימית של התיפקודים הפיסיולוגיים העיקריים, מחקר התורשה, מחקר התסיסות, והסינתזה המלאה הראשונה של התרכובות האורגניות. בכתיבהם של וירכוב, דארווין, קלוד ברנאר, מנדל, פסטר וברתלו הוגדרו מושגיו, שיטותיו ומושאייו של המחקר, המהווים את הבסיס לביולוגיה המודרנית. הגישה שונקטה באותן שנים לא השתנתה כמעט במהלך המאה ה-20. עד אותה תקופה התמקדה הביולוגיה בתצפיות בלבד, ואילו מאז ואילך התפתחה והיתה למדע ניסויי. במחצית הראשונה של המאה ה-19 היה ארגון לאופיין הבסיסי של כל החי. הוא ייצג מבנה מסדר שני, ששלט בכל דבר שניתן להבחין בו באורגניזם. בהיותו ממוקם בלב לבו של כל יצור, הוא שימש מוקד, תוכנית-אב שאליה התייחסו כל תצפית והשוואה שגוערכו במבנה הנראה של היצורים ובתכונותיהם. ואילו במחצית השנייה של המאה ה-19 כבר לא היה ארגון נקודת-המוצא להבנתם של היצורים החיים; הוא היה לדבר שצריך לדעת. מעתה כבר לא די היה לומר, שארגון מונח ביסוד כל אופייניו של אורגניזם, אלא צריך היה גם לגלות, בכל רמה, על מה הוא מבוסס, כיצד הוא נוסד, אילו חוקים שולטים בהיווצרותו ובתיפקודו. עם שינוי זה בגישה לארגון נתגלה מערך שלם של אפשרויות חקירה חדשות. מעתה ואילך כבר לא נזקקו הביולוגים לבחון חיים ככוח חבוי, בלתי-ניתן לצמצום ובלתי-נגיש, המופיע

בשלהי המאה ה-19 ובראשית המאה ה-20, סדרה שלמה של מושאים חדשים נעשו נגישים למחקר. סביב כל אחד מאלה התפתח תחום מיוחד בביולוגיה. המדע הזה התחלק בהדרגה למדורים; המלה 'ביולוגיה' איגדה טווח שלם של מדעים שונים, שלא רק יעדים וטכניקות מבדילים ביניהם, אלא גם חומרים ואוצר־מלים. שניים מבין הענפים, שראשיתם בתחילת המאה ה-20, שינו לגמרי את התמונה הקיימת על האורגניזמים, על התיפקודיות והאבולוציה שלהם: ביוכימיה וגנטיקה, שכל אחת מגלמת אחד מכיווניה של הביולוגיה. הביוכימיה, העובדת עם תמציות, חוקרת את רכיביהם של יצורים חיים ואת הריאקציות המתרחשות בהם; היא מייחסת את המבנה והתכונות של יצורים חיים לרשת של ריאקציות כימיות ולהתנהגות של סוגים ספורים של מולקולות. לעומת זאת, הגנטיקה בוחנת אוכלוסיות של אורגניזמים כדי לחקור את התורשה שלהם; היא מייחסת הן את יצירתן של צורות זהות והן את הופעתם של חידושים לאיכויות של מבנה חדש, החבוי בגרעין התא. בעוד שהוא עצמו מצוי לוחקים קפדניים, מבנה מסדר שלישי זה שולט באופיינים ובפעילויות של האורגניזם בכל הרמות. הוא מנטר את התפתחות העובר. הוא קובע את הארגון והצורה של הבוגר ואת האופיינים העיקריים שלו. הוא מקיים את המינים במהלך הדורות וגורם להופעת מינים חדשים. מבנה זה מאחסן את ה'זיכרון' של התורשה.

עריכת ניסויים

עד אמצע המאה ה-19 הוסיפה הביולוגיה להיות, בעיקרו של דבר, מדע של תצפית. צופים ביצורים החיים אך כמעט לא מפריעים לסדר שלהם כדי לנתחם. בוחנים את האורגניזמים בשלמותם כדי להגדיר את תכונותיהם ומבניהם; משווים אותם זה לזה כדי לקבוע אנלוגיות והבדלים. לדעת דארווין, כמו לדעת קוֹבֵּינָה, הטבע הוא העורך ניסויים בשביל חוקר־הטבע. כשרצו האנטומאים לקבוע את המבנה הפנימי של איברים, הם פתחו גוויות. כשניסו ההיסטולוגים לפרק בעלי־חיים וצמחים למרכיבי־היסוד שלהם, הם בחנו רקמות תחת המיקרוסקופים שלהם. כשחקרו האמבריוולוגים את

מגבכי הזמן. מעתה בחנו מה הם הגורמים שהחיים מתפרקים להם: המוצא וההיסטוריה; הסיבתיות, המקריות והתיפקודיות. לחקר האורגניזם בשלמותו היתוספו מושאי חקירה חדשים: תאים, ריאקציות וחלקיקים.

הביולוגיה התחלקה לשני ענפים, שלכל אחד טכניקות וחומר משלו. מצד אחד, היו ביולוגים שהמשיכו לחקור את האורגניזם בשלמותו, אם כיחידה ואם כחלק מאוכלוסיה או מין. ביולוגיה זו, שלא היה לה שום מגע עם שאר מדעי הטבע, פעלה על-פי המושגים של תחום תולדות-הטבע. ההרגלים, ההתפתחות, האבולוציה של בעלי-החיים והיחסים שלהם עם מינים אחרים תוארו מבלי להתייחס כלל לפיסיקה או לכימיה. מצד אחר, היו ביולוגים שניסו לצמצם את האורגניזם למרכיביו. הפיסיולוגיה תבעה זאת; הזמן היה בשל. כל הטבע היה להיסטוריה, אבל היסטוריה שבה היו היצורים ההמשך של הדברים, שבה הוצב האדם בצד בעלי-החיים. הכנסת האקראיות לעולם-החי על-ידי דארון ועל-ידי ואלאס היתה בביולוגיה כמו 'הכול מותר' של איוואן קאראמאזוב. שום תחום בחקר בעלי-החיים לא נשאר בלתי-נגיש; שום איזור לא היה בעיקרון מעבר להישגה של הידיעה; חוק אלוהי כבר לא הציב גבולות לעריכת ניסויים. ביקום שבו החליפה האקראיות את הבריאה, שאפתנותה של הביולוגיה לא ידעה גבול. אם עולם-החי מתקדם באופן מקרי, אם ניטלת ממנו התכליתיות, אזי השליטה בטבע נתונה בידי האדם. בידו לכוון את הסדר והאחדות שחיפש קודם לכן במהות החיים; ועתה יותר מכול, שהרי דיאלקטיקה ופוזיטיביזם ניסו לבנות מחדש את הגשר בין האורגני לאי-אורגני, שנהרס בשלהי המאה ה-18. ההבדל בין החומר לחי לא היה מצוי בטבעם, אלא במורכבותם. התא היה למולקולה מה שהמולקולה היתה לאטום: רמה גבוהה יותר של שילוב. כדי לחקור ביולוגיה מעין זו, כבר לא היה די לערוך תצפיות בבעלי-חיים ותו לא. צריך היה לערוך אנליזה לריאקציות הכימיות שלהם, לחקור את תאייהם ולגלות תופעות חדשות. אם עדיין נחוץ היה לבחון את האורגניזם בשלמותו, היה זה מפני שוויסות הריאקציות, תיאום התאים ושילוב התופעות איפשרו סינתזה.

החי לא בשלמותו, כפי שנעשה הדבר בעבר, אלא את התיפקודיות של כל מיקטע ומיקטע בנפרד. ראשית, באמצע המאה הלך ונחלש הצורך להידרש לכוח ויטלי. בעקבות עבודתו של בישה, כל יצור חי נחשב לשדה־קרב בין כוחות החיים לכוחות המוות; בין התהוות, הנגרמת בהשפעת 'גורם' כלשהו המיוחד לחי, ובין הרס, הנגרם על־ידי פעילויות כימיות ופעילויות פיסיקליות. עם התפתחות התרמודינמיקה ועם הסינתזה המלאה של תרכובות אורגניות, קרס המתסום שהוצב בין הכימיה של החי ובין הכימיה של החומר. שנית, תיאוריית התא הציגה יצורים חיים לא כישויות שאינן ניתנות לחלוקה, אלא כהתאגדויות של יסודות. אורגניזם, מורכב ככל שנראה, לעולם איננו אלא סכום יחידות־היסוד שלו. 'בסופו של דבר', אמר קלוד ברנאר, 'זהו בניין של יסודות אנטומיים. לכל אחד מהם יש קיום משלו, אבולוציה משלו, וגם התחלה וסוף משלו; החיים השלמים אינם אלא סכום כל החיים האינדיבידואליים האלה, מאוגדים יחד וחיים בהרמוניה.'¹ אם כן, הפיסיולוגיה צריכה היתה להיחקר על־ידי פירוק המורכבות והקושי בדרך קרטזיאנית לגמרי. בכל מקום שם אפשרי הדבר, צריך ללמוד כל מרכיב ומרכיב, ולא את האורגניזם בשלמותו. במובן זה, הפיסיולוגיה צריכה היתה לאמץ את הגישה של כל מדע ניסויי אחר. לדעת קלוד ברנאר,

בדיוק כשם שהפיסיקה והכימיה גילו את היסודות המינורליים של גופים מורכבים בעזרת אנליזה ניסויית. כך, כדי להבין את תופעות החיים, שהן מורכבות עד מאוד, צריך להעמיק לתוך האורגניזם ולנתח את האיברים והרקמות, כדי להגיע אל היסודות האורגניים.²

כשבעל־חיים נושם, הכדוריות האדומות ותאי הריאות הם הפועלים; כשהוא נע – סיבי השרירים והעצבים; כשהוא מפריש – תאי הבלוטות. איברים ומערכות קיימים לא למען עצמם, אלא למען התאים הבונים את המבנים ומבצעים את התיפקודים. תפקידם של האיברים והמערכות הוא לספק לחיים בתא את התנאים הדרושים לו, מבחינה כמותית ואיכותית. כלי הדם, העצבים וכל האיברים למיניהם מסודרים באופן שתיווצר סביבה נאותה סביב כל תא ויסופקו לו החומרים המתאימים: מזון, מים, אוויר וחום. לפיכך, באורגניזם,

התפתחות הביצית, הם התבוננו בתאים מתחלקים, בשכבות שנוצרות ובאיברים מתפתחים. רק הפיסיולוגים ניסו לפעמים לשנות באופן מכוון את תנאי החיים ולצפות בתוצאות. אולם אפילו הם לא טיפלו באיברים או ברקמות כשהם לעצמם, אלא באורגניזם בשלמותו. מאז זמנו של לְבוֹאֲזִיָה היה ברור הצורך בשיתוף־פעולה הדוק בין הכימיה לפיסיולוגיה. אולם שני תחומי מדע אלה לא יכלו להסכים על שיטות או על חומרים. הצורך להזדקק לכוח ויטלי, כדי להצדיק את האופיינים המולקולריים של האורגניזמים, הציב מכשול בלתי־עביר בין הכימיה של החיים ובין הכימיה של המעבדה.

אחרי אמצע המאה ה-19 כבר לא די היה להסביר את מבנה האיברים בתיפקודיהם, כדי לקבוע מהם הקשרים ביניהם. צריך היה לחקור את התיפקודיות של הגופים החיים עצמם ושל מרכיביהם. כאן גיצבה הפיסיולוגיה בחזית המחקר, אך טבעה השתנה. בימיו של קוֹבֵּיָה היתה הפיסיולוגיה, מעל לכול, מערכת־התייחסות בשביל האנטומיה; היא עזרה לקבוע מהן האנלוגיות שעליהן מתבססת ההשוואה בין יצורים חיים ובין הארגון שלהם. קלוד ברנאר ראה את הפיסיולוגיה באור שונה לגמרי. מעתה כבר לא היה ניתן לפרש את התיפקודיות של איבר במונחים של מבנה ומירקם, אלא צריך היה לנתח אותה, לפרקו לפרמטרים שונים, ואפילו, עד כמה שניתן, למדוד אותה. מכאן ואילך אנטומיה היא ששימשה מדע־עוז לפיסיולוגיה. מעתה כבר לא היתה פיסיולוגיה של תצפית, הכרוכה במה שקלוד ברנאר כינה בשם 'עריכת ניסויים סבילה' – שבה הביולוג רק רושם את הווריאציות הנוצרות באופן ספונטני במערכת – אלא מדע 'פעיל', שבו החוקר מתערב ישירות, בוחר את האיבר, מבודד אותו, גורם לו שיתפקד, משנה את התנאים ומנתח את המשתנים. הביולוגיה צריכה היתה לשנות את מקום עבודתה. קודם לכן היא ערכה אותה בטבע: כשחוקר־הטבע לא היה בשדה, צופה ביצורים החיים בסביבת המחיה שלהם, הוא עבד במוזיאון לתולדות־הטבע, בגן־חיות או בגן בוטני. מכאן ואילך נערכו מחקריה של הביולוגיה במעבדה.

שתי סיבות, לפחות, היו לניסיון לחקור את התיפקודיות של היצור

מרכיב־התא הוא אוטונומי, מאחר שהוא מכיל בתוכו, בגלל טבעו הפרוטופלסמי, את התנאים החיוניים לחיים: הוא איננו שואל ואף איננו נוטל משכניו או מהאורגניזם השלם. אולם, הוא מתובר לאורגניזם השלם באמצעות תיפקודו, או התוצר של תיפקוד זה.³

כדי לתאר את האורגניזם החי השתמש קלוד ברנאר במטפורה של חברות או בתי־חרושת, שבזכות חלוקת־העבודה הקיימת בהם כל היסודות שלהם פועלים לטובת הכלל. האיברים 'בגוף החי הם כמו בתי־חרושת או גופים תעשייתיים בחברה מתקדמת, המספקים אמצעי לבוש, חימום, מזון ומאור לפרטים בחברה'. למידת הפיסיולוגיה משמעה חקירתה של מערכת כזאת.

אולם עצם מורכבותם של הגופים החיים מעוררת שני סוגים של קשיים. ראשית, בניסיון להגיע אל היחידות החבויות ביותר באורגניזם יש משום סיכון שהוא עלול להיפגע באופן רציני, באופן שיפריע או אפילו ימנע את ביצוע תיפקודיו. לכן יש לגשת בהדרגה לעריכת ניסויים באורגניזם: תחילה ללמוד את המערכות התיפקודיות העיקריות, אחר־כך את האיברים, אחר־כך את הרקמות, ורק לבסוף את התאים האוצרים את איכויות החיים. שנית, כשמדובר ביצורים חיים, התופעות המתרחשות באיבריהם השונים אינן בלתי־ליויות זו בזו. בצמחים או בבעלי־חיים ירודים, כמו הידרה או פְּלַנְרִיָה, מיקטעים שנחתכו מהאורגניזם מסוגלים לשרוד ואף לגדול. אולם בבעלי־חיים עילאיים, כפיפותם של החלקים לשלם היא העושה את האורגניזם למערכת מאוחדת, פרטי־יחיד. כל תא אמנם ניחן בתכונות החי, ויש לו קיום אוטונומי, פחות או יותר, אבל בכל זאת אין הוא פועל אלא למען הכלל. לפיכך צריך הפיסיולוג לנסות לפרק את האורגניזם ולבודד את רכיביו בחקירה ניסויית, אבל מבלי לבחון אותם בנפרד. את הפיסיולוגיה של איבר ניתן להסביר רק בהתייחסות לאורגניזם בשלמותו. 'הדטרמיניזם בתופעות החיים הוא לא רק דטרמיניזם מסובך מאוד, אלא גם משועבד באופן הרמוני', אמר קלוד ברנאר.⁴ התופעות הביולוגיות מסובכות מן התופעות הפיסיקליות לא בגלל טבען וגם לא בגלל תכונה המיוחדת לחי. הן מסובכות יותר, כי אי־אפשר לבודדן כלל. הן מייצגות תמיד את התוצאה של סדרת אירועים

הנשארים קשורים ללא הפרד ומחוללים זה את זה. בפיסיולוגיה, פעולת־הגומלין בין התיפקודים ותלותם ההדדית היא היוצרת את המורכבות.

מאחר שאין הוא מנסה כלל לטעון, שהיצורים החיים אינם כפופים לחוקים השולטים בחומר דומם, הפיסיולוג חייב איפוא לנסות ולנתת, בשיטות פיסיקליות וכימיות, את התופעות המתרחשות באורגניזם. לא מפני שהפיסיקה והכימיה יכולות לפתור את כל הבעיות של הביולוגיה, אלא מפני שהן פשוטות יותר מהפיסיולוגיה ומפני שצריך להשתמש תמיד בפשוט כדי להבהיר את המסובך. הביולוגיה צריכה 'לשאול את השיטה הניסויית מהפיסיקה ומהכימיה, אך לשמור על תופעותיה וחוקיה המיוחדים', אמר קלוד ברנאר. ואז תוכל הפיסיולוגיה להפוך למדע פעיל. עד אותה תקופה, הפרעה לאורגניזם רק עלולה היתה לפגום בטבעו ולגרום נזק לתיפקודיו. מאז התאפשר לנתח גוף חי ולערוך בו ניסויים, מבלי להרוס בהכרח את עצם איכות החיים בתנאים המלאכותיים שנוצרו באופן זה. מעתה התאפשר להפריד מרכיבים מסוימים של הגוף בשיטות מכניות וללמוד את תיפקודיהם, ואף להסיק מסקנות על תפקידם הטבעי באורגניזם, אם כי תוך נקיטת זהירות מתאימה. היה חשוב להתיר את הסבך של רשת הפעולות, המתרחשות סימולטנית בגוף חי, לערוך ניסויים בתנאים מוגדרים, עד כמה שהדבר אפשרי, ולבודד תופעות פשוטות. לדעת קלוד ברנאר, הפיסיולוג חייב להיות 'ממציא של תופעות, משגיח אמיתי של הבריאה'⁵.

תופעה יכולה להיווצר במקרה בעת תצפית, או כתוצאה לוגית של השערה. למעשה, יש בפיסיולוגיה שני מתכונים שכמעט אי־אפשר לטעות בהם לייצור תופעות. המתכון הראשון הוא לשחזר בניסוי מה שהטבע עושה במחלה. במובן מסוים, הפיסיולוגיה והרפואה מייצגות שני ענפים של אותו מדע, לא רק בשל מושא המחקר שלהן, אלא גם בגלל השיטות הדומות שהן נוקטות. ביחסים שבין הנורמלי לפתולוגי, כל תחום מכווין את התחום האחר. רפואה כבר איננה יכולה להישאר אמפירית, אלא צריכה להתבסס על תוצאותיו של המחקר הפיסיולוגי. ולהיפך, ידיעת התנאים הפתולוגיים

תורמת לידיעת המצב הפיסיולוגי. רפואה סוללת את הדרך לפיסיולוגיה. היא מראה היכן לפעול. היא מצביעה על התוצאים שצריך להשיג. אפשר לתקן מכונה, רק אם מכירים את חלקיה וכיצד הם פועלים. ולעומת זאת, גרימת נזק במתכוון לאיבר מאפשרת להגדיר את תפקידו. פתולוגיה מציעה איפוא מודלים לפיסיולוג, המנסה ליצור מחלה על-ידי גרימת גריעות באיזור מצומצם ככל האפשר, ואחר-כך לנתח את התוצאות. אחת השיטות היעילות ביותר שנוקטת הפיסיולוגיה מבוססת על גרימת נזק מכוון ומיוחד לרכיב אחד בגוף באמצעים מכניים או כימיים, קביעת תוצאי הגריעה והגדרת התגובות של הרכיבים האחרים. אפשר לסלק איבר, כליה למשל; או להרוס אותו במקום שהוא נמצא בו, למשל, לבלב על-ידי הזרקת פרפין; או לפצוע אותו, למשל, שלפוחית המרה, על-ידי קשירת צינורית מיץ המרה בחוט. אפשר להסיק על השפעות הגריעה על-ידי השוואה עם בעל-חיים בריא. אפשר אפילו לנסות ולטפל בבעל-חיים פגועים מעין אלה על-ידי הזרקת חומרים מסוימים, או אפילו תמציות בלתי-פגועות של הרקמות שמדובר בהן. אפשר גם לנסות ולפצות על אי-סדירויות מסוימות על-ידי יצירת גריעות נוספות באיברים אחרים. שיטת חקירה זו, גרימת גריעות מכניות, פתחה את הדרך לבחינתם של תיפקודים רבים. למשל, היא הוליכה להבחנה בין 'הפרשה' (excretion) על-ידי רקמה שאיננה יוצרת דבר בעצמה, אבל מאפשרת פינויים של חומרים הנוצרים בפנים, ובין 'הפרשה' (secretion) על-ידי בלוטה המושכת תרכובות מסוימות, מצרפת אותן יחד ויוצרת חומרים חדשים. את ההפרשות מן הסוג האחרון אפשר לסווג על-פי שתי קטגוריות: 'תיצוניות' כשהתוצר מופרש מחוץ לאורגניזם, ו'פנימיות' כשהוא זורם לתוך האורגניזם ועוזר בעיכול או בתיפקוד אחר. מאה שנות מחקר עדיין ציפו לתחום זה. למעשה, בשיטה זו השתמשו מאוחר יותר להגדיר תהליכים מטבוליים מסוימים בבעל-חיים עילאיים, לערוך אנליזה לעיכול, לגלות הורמונים, לקבוע מהו תפקידם של עצבים מסוימים ולאתר את תיפקודי המוח.

התערבויות מכניות אפשר להחליף בגריעות כימיות. על-ידי התוצאים שלהם, רעלים מְדַמִים מחלות. יתרה מזו, הם פועלים

בצורה ברירנית על איברים. לאחר הזרקת תוצר רעיל, אפשר כמעט תמיד למצוא גריעות ברקמה מסוימת, בכל מקום שהיא מצויה בגוף. רכיב היסטולוגי נתון מושפע תמיד על־ידי רעל נתון. פתמן תדחמצני, למשל, תוקף כדוריות אדומות ומונע מהן למלא את תפקידן בנשימה; מלחים של מתכות מסוימות פוגעים בתאי הכליה, מקשים על פינוי חומרי־פסולת מהדם דרך השתן; קורָרָה משפיע על תאי עצב ועוצר את הולכת העירור העצבי ובכך גורם שיתוק אצל בעל־החיים. אפשר אפילו לחפש אנטידוטים, המנטרלים באופן יחודי את פעולת הרעל ומאפשרים לאיבר הפגוע לשוב ולתפקד. עם מחסן הרעלים יש ברשות הפיסיולוגיה אמצעי שאין ערוך לו: פשטות בשימוש, יחודיות בפעולה, בקרה על התוצא על־ידי ויסות המינון, ולעתים אף הפיכות הגריעות, כלומר, השבת המצב לקדמותו. השימוש בחומרים רעילים היה איפוא אחת השיטות המקובלות על הפיסיולוגים במשך יותר ממאה שנה, ועדיין הוא ממלא תפקיד חשוב בחקירת תיפקודים ובחקר ריאקציות כימיות – באורגניזם, בתא, או בתמציות אל־תאיות, הנמצאות במבחנות.

המתכון השני ליצירת תופעות בפיסיולוגיה מבוסס על שיווי־המשקל, שלעולם איננו יציב אך תמיד שב ומופיע, בין האורגניזם לסביבתו. פעולת־גומלין זו היא הדוקה כל־כך, עד שהאורגניזם חייב כביכול להגיב על כל שינוי הקורה בסביבה. לדעת קלוד ברנאר, במובן זה יש דמיון בין גופים חיים לגופים דוממים. בכל תופעה צריך תמיד לקחת בחשבון שני דברים: המושא שצופים בו, והנסיבות החיצוניות, המשפיעות על המושא הזה וגורמות לו לגלות את תכונותיו. אילו סולק הגורם הסביבתי, התופעה היתה נעלמת, כאילו סולק המושא עצמו. יש משיכה רק אם התנהגותם של שני גופים נמצאת תחת תצפית; ממש כשם שזרם חשמלי קיים רק בגלל הקשר בין נחושת לאבץ. ברגע שנסלק את אחד הגופים או את הנחושת, לא יימצאו לא משיכה וגם לא זרם חשמלי: הם הופכים להיות רעיונות מופשטים. הוא הדין ביצורים חיים. 'התופעה הוויטלית איננה מצויה איפוא במלואה לא באורגניזם וגם לא בסביבתו', אמר קלוד ברנאר; 'היא, במובן מסוים, התוצא שהתקבל מן הניגוד בין האורגניזם החי לסביבה המקיפה

אותו. "סילוקה או הריסתה של הסביבה הריהן כסילוקו או הריסתו של האורגניזם. ואם ננסה זאת בקיצוניות, כפי שעשה זאת כבר לבואזיה, האורגניזם אף יכול להיחשב למעורר של סביבתו. אולם מעתה כבר אין הסביבה רק הנוזל, האוויר או המים, האופפים את האורגניזם. בעקבות אוגוסט קונט, היא גם הפכה לתום, לחץ, חשמל, אור, לחות, תכולת חמצן או פחמן דו-חמצני ונוכחות תרכובות כימיות, מועילות או רעילות – בקיצור, כל מה שבא במגע עם המעטפת של אורגניזם חי ופועל עליו בדרך כלשהי. מאחר שניתן לשנות כל אחד מהגורמים האלה, כל אחד מהם הופך לפרמטר בעריכת ניסויים. במערכת אורגניזם-סביבה יש שתי סדרות משתנים מצומדות: חלקם חיצוניים, שעליהם פועל הניסוי באמצעים פיסיקליים וכימיים, על-פי בחירתנו; חלקם פנימיים, הבאים לידי ביטוי בתיפקודים, שגם אותם צריך למדוד בשיטות פיסיקליות וכימיות. 'טיפול' שלנו בראשונים מאפשר להגיע לאחרונים. כדי ליצור תופעה, די להניח יצור חי, איבר, פיסת רקמה או אפילו תמצית בתנאי סביבה מוגדרים ככל האפשר, ולשנות באופן שיטתי כל פרמטר של הסביבה. לא יהיה זה מוגזם לומר, שמאז ואילך פרוצדורה זו היא הפעילות העיקרית המתרחשת במעבדות לביולוגיה.

עד אז סווגו היצורים החיים לפי דרגת מורכבותם. מעתה היתוסף יחס תיפקודי ליחס המבני. ניתן לקבוע זיקה בין דרגת הארגון ביצורינו חיים ובין סוג פעולת-הגומלין עם הסביבה. מצד אחד, קיימים האורגניזמים הפשוטים, שיש בהם רכיב אנטומי יחיד, כגון פטריית האינפוזוֹרְיָה, או אפילו אורגניזמים המורכבים מכמה תאים, כגון בעלי-חיים או צמחים ירודים. באורגניזמים אלה, כל החלקים הרכיביים באים במגע ישיר עם התווך הסובב אותם – כלומר, המים או האוויר שמסביבם. מצד אחר, יש אורגניזמים מורכבים יותר, במיוחד בעלי-החיים העילאיים יותר, שיש בהם מספר גדול של תאים. אצל אלה, רק הרכיבים שעל שטח-הפנים באים במגע ישיר עם מה שקלוד ברנאר כינה בשם 'תווך קוסמי'. החלקים החבויים בעומק האורגניזם שרויים ב'סביבה פנימית' (milieu intérieur) או 'תווך אורגני', הפועל כמתווך עם התווך הקוסמי. באדם, למשל, הרכיבים המהותיים, אלה המבצעים את רוב התיפקודים החשובים,

אינם תשופים לווריאציות ולסיכונים שבתווך החיצוני. הם נמצאים במגע רק עם הדם ועם נוזלי הגוף, המגינים עליהם מכל שינוי פתאומי. שכן, האופיין העיקרי של הסביבה הפנימית הוא קביעותה. מאחר שהיא נוצרת על-ידי איברים למען איברים, היא פועלת כבלם-זעזועים, 'באפר' המגן על יסודות הגוף החשובים ביותר מפני שינויים בלתי-צפויים, כך שיוכלו לפעול בתנאים כמעט בלתי-משתנים. לדעת קלוד ברנאר,

די נכון לומר שעופות המעופפים באוויר אינם חיים למעשה באטמוספירה, או דגים במים ושלשולים באדמה. האטמוספירה, המים והאדמה הם מעטפת שניה סביב מצע החיים, המוגן כבר על-ידי הדם הזורם בכל מקום ויוצר את גדר-המגן הראשונה סביב כל החלקיקים החיים.⁷

אפשר לומר שבעלי-החיים העילאיים חיים למעשה בתוך עצמם.

מושג הסביבה הפנימית מצדיק, בהקשר לתיפקוד, את הדרך שבה הציב קוֹבֵיָה את המבנים של האורגניזם במרחב. הרכיבים החשובים ביותר קבורים במעמקי הגוף, מפני שכך הם מוגנים טוב יותר מתקלות בתווך המקיף אותם. באופן זה הם יכולים לעבוד, מוגנים מפני שינויים קלים בטמפרטורה, בלחות, בלחץ וכו'. מורכבותו של הארגון פירושה חופש תיפקוד. אי-תלות בסביבה הופכת בסופו של דבר לגורם ברירני באבולוציה. וכך אפשר עכשיו להפוך על פיו את סיווג היצורים החיים: אפשר להציבם מחדש לפי טבעה של ה'סביבה' שלהם, כלומר, מידת עצמאותם ביחס לעולם החיצוני. יש שלושה סוגי קיום. בקבוצה הראשונה, המורכבת מיצורים ירודים, יש תלות מוחלטת בתנאים החיצוניים. כשהתנאים טובים, החיים מתנהלים כסדרם. כשהתנאים משתנים לרעה, האורגניזם מת או שהוא שוקע ל'מצב רדום' של 'אדישות כימית': כל השיחלופים, כל הפעילויות, כל ביטויי החיים – נעצרים. בקבוצה השנייה, הכוללת בעלי-חיים וצמחים ירודים, הסביבה הפנימית תלויה פחות בתנאים החיצוניים; התנודות בסביבה עדיין משפיעות על חי האורגניזם, מקטינות או מגבירות את חיוניותו, אך לעולם אינן מדכאות אותה כליל. בדרך-כלל, טמפרטורת הגוף, בהשפעת הטמפרטורה החיצונית, היא המווסתת את תנועותיהם של

'חיים' בתנודה' אלה. בקבוצה השלישית והאחרונה, קבוצת בעלי-החיים העילאיים, כל הפעילויות אינן תלויות כלל בתנאים החיצוניים. תהיינה התהפוכות המתרחשות בסביבתם אשר תהיינה, האורגניזמים מוסיפים לחיות את חייהם כרגיל כאילו היו בתממה: אלה הם 'חיים יציבים וחופשיים, שאינם תלויים בשינויים המתרחשים בתווך הקוסמי'. ככל שהאורגניזם מורכב יותר, כן הוא עצמאי יותר.

הסביבה הפנימית ויציבותה הדגישו את אחת התכונות הבסיסיות של היצורים החיים: ויסות התיפקודים. הן סיפקו דרך למדוד את דרגת השילוב של אורגניזם, בכך שאיפשרו עריכת ניסויים על התיאום שבין איברים לתיפקודים. חקירה זו הוליכה לייצוג של האורגניזם כמערכת שבה כל הפעילויות מכוונות עד לפרט האחרון. כבר במאה ה-18 נבחנה פעולת-הגומלין בין תיפקודים מסוימים. לדעת לבואזיה, המכונה האנימלית נשלטה על-ידי שלושה 'וסתים' עיקריים: נשימה, עיכול ואידוי. לדעת קלוד ברנאר, כל פעילויות הגוף נמצאו תחת פיקוחם של מנגנוני ויסות. 'לכל המנגנונים הוויטליים, שונים ככל שיהיו, יש רק תכלית אחת: לקיים את אחדותם של תיפקודי החיים בסביבה הפנימית'.⁸ מדובר במנגנונים של 'שיווי-משקל'; ומנגנונים של 'פיצוי', 'בידוד' ו'הגנה', המווסתים את הטמפרטורה, כמות המים, תכולת החמצן, כמות המזון, הרכב הדם וההפרשות הפנימיות והחיצוניות. כל כמה שארגון של בעלי-החיים מורכב יותר, כן מדויקת דרגת הכיוונון של מנגנוני הוויסות שלו. מכאן שבפיסיולוגיה יש יתרון בשימוש באורגניזמים שבהם מערכות אלו מושלמות יותר, כלומר, בבעלי-חיים עילאיים. לדידה של הביולוגיה במאה ה-19, ארגון היצורים החיים התבסס בעיקר על שילוב תיפקודיהם. לדברי קלוד ברנאר, החיים אפשריים רק משום 'שמתקיים איזון כתוצאה מפיצוי עדין ומתמיד, הנערך במאזניים רגישים ביותר'. חייבים להתקיים מנגנוני ויסות, מצד אחד, כדי להגן על התאים מפני שינוי שלא בעיתו, ומצד אחר, כדי לתאם פעילויות בודדות לטובת הכלל. החלקים צריכים לתפקד בהרמוניה עם השלם. וקלוד ברנאר מביא שוב את הדוגמה של בית-החרושת, כדי לתאר את תופעות הוויסות ביצורים חיים.

האורגניזם מייצג... מה שמתרחש בבית-חרושת לתותחנים, למשל, שם מייצר כל פועל חלק אחד באופן בלתי-תלוי בחברו לעבודה המייצר חלק אחר, ואין הם יודעים מהו המוצר המוגמר. אחר-כך צריך לבוא פועל, המרכיב יחד את החלקים בצורה הרמונית.⁹

באמצע המאה ה-19 ייצגה מערכת העצבים את 'יוצר הרמוניית התיפקודים' הגדול בבעל-החיים הבוגר, המווסתת לא רק את קצב הלב, הנשימה, תכולת התמצן וטמפרטורת הגוף, אלא גם את ריכוזי המלח והמים, את הפעילות הכימית של הכבד, את הפרשת הרוק, הזיעה וכן הלאה. בתחילת המאה ה-20 נוספו מנגנוני ויסות אחרים, בעלי טבע כימי: הורמונים. בעקבות עבודתו של קאנון, התיאום והקביעות האלה של הסביבה הפנימית היו ל'הומיאוסטזיס'. ויסות הוא אחד המושגים שעליהם מיוסדת הביולוגיה המודרנית, על היבטיה המגוונים ביותר. בזכות מושג זה יכלה הביולוגיה, סוף כל סוף, להציע מודל לפיסיקה: מערכות שנצפו ביצורים חיים שימשו לווינר בסיס לפיתוח הקיברנטיקה.

בזכות שיטותיה של הפיסיולוגיה התאפשר איפוא לקרוא אמצע המאה ה-19 לנתח היבטים שונים רבים של תיפקוד האורגניזמים. אולם תורשה ורביה יצאו מכלל זה. שכן, לפי קלוד ברנאר, 'תורשה איננה אלמנט הנתון לשליטתנו, או שאנו יכולים להשתלט עליו כפי שהשתלטנו על תכונות ויטליות'.¹⁰ תיאוריית האבולוציה הפכה את הרביה למנגנון האחראי להשתמרותם של מבנים מזה ולשינויים מזה. תיאוריית התא מיקמה מנגנון זה בתוך התא, ולמען הדיוק, בביצית. אולם תורשה ורביה נתנו רק דריסת-רגל קטנה לניסויים פיסיולוגיים. מובן שהיה אפשר להפריע לעובר, לגרום נזק לתאים מסוימים או לרקמות מסוימות, ולעכב את התפתחותו. אך בדרך-כלל היתה התוצאה העיקרית הריגת העובר, או הפרעה חמורה לסידורו. מעולם לא פנתה המורפוגנזה אל כיוון חדש שאיננו מתיישב עם טבעה של הביצית. אפשר לטפל בביצית של ארנבת בכל דרך העולה על הדעת; אפשר להשמיד אותה או לגרום להפלת העובר, אך 'לעולם אי-אפשר ליצור ממנה כלב או כל יונק אחר'.¹¹ המתכונים שנמצאו מוצלחים כל-כך בפיסיולוגיה, לא היו ישימים בתורשה. מעתה, חקר הצורות כבר לא היה בתחומה של הכימיה, וכבר לא היה כפוף לחוקיה. הוא היה מעבר לניסוי.

מאחר שיכלה רק 'להרהר' על התורשה אך לא לערוך לה אנליזה, נאלצה הביולוגיה להסתפק בתיאור היווצרותו של דומה מדומה והשתמשה בדימויים הלכותיים מאוצר המלים של המאה הקודמת. ביציות ותאי זרע באו במקום זרעים; תאים במקום מולקולות אורגניות; היווצרות העובר, שממנו מופיע הבוגר, תוצאה של חלוקת תאים והתמיינות תאים. אך כדי שביצית תעתיק את האורגניזם ההורה, כדי ליצור את הזהה ברצף הדורות, נדרשה מערכת זיכרון שתדריך את התאים. הביצית היא הופעה, היא מעין ייצוג של נוסחה אורגנית המסכמת את היצור אשר ממנו היא באה ואשר את זכרונו האבולוציוני היא שומרת כביכול.¹² באותם ימים, משמעה של אבולוציה היה סדרה של טרנספורמציות המתרחשות במהלך ההתפתחות העוברית; משמעו של זיכרון היה 'כוח תורשתי', 'מצב קודם' של הביצית עצמה, 'דחף פרימיטיבי', המוביל בהכרח את המחזור מהתרגולת לביצה ומהביצה לתרגולת. ובאשר לטבעו של זיכרון זה, הוא כמעט לא היה שונה ממה שהוצע במאה ה-18. כמופרטואי לפניהם, כן ראו דארווין והקל לדעת דארווין, כל תא בגוף של המוליד שולח נבט, או 'גמול', אל תאי הרבייה, מעין שגריר לייצג את התא בדור הבא, ובצורה כלשהי מרכיב אותו. לדעת הקל, התאים מכילים חלקיקים או 'פלסטידים', המבצעים תנועות מיוחדות; מאחר שהם ניחנים בזיכרון, הם שומרים מדור לדור את התנועה המיוחדת המבטאת את פעילותם. לעומת זאת, קלוד ברנאר, כמו בופון, מיקם את הזיכרון לא בחלקיקים המרכיבים את האורגניזם, אלא במערכת מיוחדת המכוונת את התרבותם והתמיינותם של התאים ואת היווצרותו ההדרגתית של האורגניזם. הביצית מכילה איפוא 'עיצוב', המועבר על-ידי 'מסורת אורגנית' מיצור אחד למשנהו. היווצרות האורגניזם פועלת לפי 'תוכנית', המבוצעת בהתאם ל'הוראות' קפדניות מאוד. היא מכוונת לא רק את התפתחות העובר, אלא גם את תיפקודיותו, מבנהו ותכונותיו של הבוגר העתידי, עד לפרט האחרון, שהרי יש באדם מחלות מסוימות העוברות מאב לבן. כבר מהביצית, הכול מתואם וצפוי מראש לגבי התפתחות היצור החדש ותחזוקתו במשך כל חייו. קלוד ברנאר אמר, ש'לכל פעולה של אורגניזם חי יש תכלית משלה בתחומי מעגלו של האורגניזם'.¹³

הפיסיוולוגיה הניסויית נשארה איפוא חסרת־אונים בחקר הרבייה. ללא אמצעים להפוך השערות לניסויים, ללא טכניקות שניתן להתאימן למצב, וללא חומר המתאים לשיטותיה, היא לא יכלה להתמודד עם נושא התורשה. כל כמה שהיו שיטות ההכלאה מתאימות לטיפוח בעלי־חיים וצמחים, הן לא התאימו כמדומה לחקר הרבייה. למעשה, הפיסיוולוגיה מעוניינת בפרט־היחיד. בכל פעם נבדק אורגניזם אחד, כדי לצפות בתכונותיו, התנהגותו והריאקציות שלו בנסיבות שונות. אולם תצפית באוכלוסיות, שיש ביניהן קשרי קירבה, ולא תצפית בפרטים, היא ששללה את הדרך לחקר התורשה על־ידי ניסויים. כבר דארווין השתמש בגישה זו, כדי להסביר שהשתנות היא תוצאה של תנודות סטטיסטיות, החייבות להופיע באוכלוסיות גדולות. על־ידי מעקב אחר התנהגות של תכונות אופייניות מעטות אצל אוכלוסיות גדולות דור אחר דור, הצליח מנדל להדגים את תופעות התורשה, למדוד אותן, ולנסח את חוקיהן. אולם, בעיקרו של דבר, הפיסיקה, בגלל הצורך להשתלט על מסות עצומות של מולקולות המרכיבות את הגופים, היא שהפכה את המקריות לחוק היקום.

ניתוח סטטיסטי

בראשית דרכה נפרדה הביולוגיה במתכוון מהפיסיקה. אולם אחרי אמצע המאה ה־19 התחדשו הקשרים ביניהן באמצעות התרמודינמיקה. ראשית, מאחר שבזכותם של המושגים אנרגיה ושימור אנרגיה נעלמה אחת המוזרויות של עולם־החי. שנית, מאחר שברצותה לקשור את תכונותיהם של גופים עם מבניהם הפנימיים שינתה המכניקה הסטטיסטית את דרך ההסתכלות בדברים, ביצורים, ואפילו באירועים של חיי יום־יום. בעשורים הראשונים של המאה ה־19, תופעות מכניות נותחו תמיד במונחים של מרחב, זמן, כוח ומסה. הכוח הוצג כגורם של תנועה, כקיים מראש ובלתי־תלוי בה. לדעת קארנוֹ היו שתי דרכים לבחון את המכניקה לפי עקרונות אלה: 'הראשונה, לראות את המכניקה כתיאוריה של כוחות, כלומר, של גורמים המפיקים את התנועות. השניה, לראותה כתיאוריה של התנועות עצמן.' החומר הוא אחיד, אך מספר

הכוחות, טבעם וגיוונם עולה בהתמדה. אותן תופעות שבהן בא חום לידי ביטוי, התקשרו יותר ויותר עם תנועת הגופים, למשל, בחקר הגזים. כך נוצר בפיסיקה תחום חדש, שבו, על-ידי מדידת שינויים בחום, ניסו הפיסיקאים לנתח את הקשרים בין תכונות הגופים מבלי לדעת את המבנה שלהם לפרטיו. הכוחות הפועלים בתחומים כה שונים זה מזה – תנועה, חשמל, מגנטיות, חום, אור, ריאקציות כימיות – מצאו מכנה משותף במושג 'אנרגיה'. אנרגיה היא כל צורה של עבודה, והיא כל דבר היוצר עבודה או נוצר על-ידי עבודה. באופן מוחלט, אנרגיה איננה מתכלה, ממש כמו חומר, אך יכולות להתחולל בה תמורות הגורמות להופעתה בצורות שונות. עקרון שימור האנרגיה הופך כל שינוי בטבע להמרת אנרגיה. הוא רואה צורות שונות של אנרגיה כעצמאיות ובעלות ערך שווה. לכל צורת אנרגיה יש גורם עוצמה המתאים לו: גובה בכבידה, טמפרטורה בחום, הבדל פוטנציאלים בחשמל. תנודות במערכת נובעות מהבדלים בגורמים אלה.

אולם שימור האנרגיה לא הסביר את הסתירה שבין אירועים מסוימים שניצפו בפיסיקה. תופעות המכניקה או תופעות האלקטרודינמיקה הן הפיכות; הן יכולות להתקיים בכל כיוון, ובנוסחאות המכניקה הסימן (+ או -) של משתנה הזמן איננו משחק שום תפקיד. לעומת זאת, תופעות חומניות או כימיות הן בלתי-הפיכות: הן מתרחשות תמיד בכיוון אחד; למשל, חום איננו יכול לזרום מקר לחם. ב'מערכת סגורה', כמות האנרגיה נשארת קבועה. אולם לא רק כמות האנרגיה היא האופיינית למערכת, אלא גם איכות האנרגיה. ככל שאנרגיה שְׁמִיֶּשָׁה יותר, וככל שמיטיבים להמיר אותה לעבודה, כן עולה איכותה. יש איפוא צורות אנרגיה 'אצילות' יותר, כמו במכניקה, וצורות אנרגיה 'ירודות' יותר, כמו חום. אולם במערכת שאין מתערבים בה, איכות האנרגיה נוטה באופן טבעי לפחות, לא לעלות. מכאן הדרך החד-כיוונית הנאכפת על תופעות מסוימות. כשחום זורם מהם לקר, הרי זה משום שחלה ירידה באיכות האנרגיה מבלי שתשתנה כמותה. כמו כדור במורד מדרגות, היא חייבת לרדת למטה ולעצור רק משהגיעה לתחתית. מצב זה של שיווי-משקל קרוי בפי הפיסיקאים רמת ה'אנטרופיה' המירבית. אנטרופיה איננה מושג מעורפל. זוהי כמות פיסיקלית

בת־מדידה ממש כמו טמפרטורה של גוף, חום סגולי של חומר, או אורך של אובייקט. היא מאפשרת לתאר במדויק את שינויי המצב העשויים להתחולל בגוף או במערכת. אם גוף מקבל חום, האנטרופיה שלו עולה; אם הוא מאבד חום, האנטרופיה שלו פוחתת. החוק השני של התרמודינמיקה, השולט בתופעות הפיסיקליות שביקום, קובע, שבמערכת סגורה, האנרגיה נוטה לפחות, ולפיכך האנטרופיה נוטה לעלות: לבסוף, התנועה חדלה, הבדלים של פוטנציאל כימי או פוטנציאל חשמלי מתבטלים, והטמפרטורה נעשית אחידה. ללא הספקת אנרגיה מבחוץ, כל מערכת פיסיקלית דועכת ונעה לקראת מצב של אינרציה מוחלטת.

מושגי התרמודינמיקה הפכו על פיה את הדעה בדבר הפרדה מוחלטת בין יצורים לדברים, בין הכימיה של החי ובין הכימיה של המעבדה. עם מושגי האנרגיה ושימור האנרגיה, שאיחדו את צורות העבודה השונות, כל הפעילויות של האורגניזם יכלו להיגזר מחילוף־החומרים שלו. כל דבר שיצור חי יכול היה לבצע במונחים של תנועה, חשמל, אור או קול נעשה מעתה תוצאה של המרת אנרגיה כימית, שהשתחררה על־ידי בעירה של חומרי מזון. היו לפיכך שתי הכללות, שקירבו את הביולוגיה לפיסיקה ולכימיה: האחת, אותם יסודות מרכיבים את היצורים החיים ואת חומר הגלם הדומם; והשנייה, שימור האנרגיה ישים באירועים המתרחשים בעולם־החי ובאלה שבעולם־הדומם גם יחד. חוקרים שונים, למשל הלמהולץ, שהבינו את האוניברסליות של עקרונות אלה, הסיקו מסקנה פשוטה: אין כל הבדל בין תופעות המתרחשות ביצורים חיים ובעולם־הדומם. במבט ראשון, דומה שיצורים חיים – בגלל הגדילה, ההתפתחות והיכולת שלהם לקיים את מבניהם דור אחר דור – נמצאים בסתירה לחוק השני של התרמודינמיקה, המכתיב דעיכה רצופה של היקום. אולם אף־על־פי שהתרמודינמיקה כופה את הכיוון הכללי של מערכת, אין היא שוללת יוצאים מן הכלל מקומיים, וגם איננה אוסרת תנועה־שכנגד של יסודות מסוימים על חשבון שכניהם. המערכת בשלמותה היא הדועכת, לא כל חלק וחלק שלה. מאחר שהם מקבלים אנרגיה מסביבתם המיידית בצורת מזון, היצורים החיים יכולים לשמור על רמה נמוכה של אנטרופיה במהלך הזמן. הם גם יכולים לייצר ברציפות את המולקולות

היחודיות הגדולות, האופייניות להם, מבלי להפר את חוקי התרמודינמיקה. המושגים אנרגיה ושימור אנרגיה מילאו את אחד התפקידים שבעבר ייחסה הביולוגיה לכוח ויטלי. בתחילת המאה ה-19 השתמש האורגניזם בכוח ויטלי בביצוע עבודת הסינתזה והמורפוגנזה שלו; בשלהי המאה הוא צרך אנרגיה.

לחקר אוכלוסיות גדולות ולשימוש בשיטה הסטטיסטית בניתוח אוכלוסיות אלה היו תוצאות מרחיקות-לכת אף יותר לגבי הדרך שבה בחנו הביולוגיה ומדעים אחרים יצורים ודברים. במאה ה-19 איפשר חקר הגזים לקשור חום לתנועה של חלקיקים, ובכך לחבר את תכונותיו של גוף עם מבנהו הפנימי. אפשר היה לראות גז כאוסף של מולקולות בתנועה חופשית. לדעת ברנולי, ג'אול וקלאוזיוס, לכל החלקיקים יש אותה מהירות: זה מאפשר לבסס רשת של קשרים בין תכונות מסוימות של הגזים, כמו לחץ, טמפרטורה וצפיפות. לעומת זאת, לדעת מקסוול, לא יתכן שלכל החלקיקים אותה מהירות, שהרי תנועותיהם נגרמות על-ידי ההתנגשויות ביניהם. גז מייצג אוסף של 'כדורים קטנים, קשים ואלסטיים מאוד, הפועלים זה על זה רק בעת ההתנגשות ביניהם'. אפשר לבנות מודל מכני טהור של גז: החלקיקים נעים בהתמדה מרחק מסוים, מתנגשים, נעים שוב, מתנגשים ונעים שוב. לכל חלקיק יש איפוא מהירות ותנועה המיוחדים לו. לדברי מקסוול, 'כל חלקיק נושא את האנרגיה שלו ואת התנועה שלו'. והאופיינים של כל חלקיק משתנים כל העת כתוצאה מהתנגשויות מקריות. לא בא איפוא בחשבון לחקור בפירוט רב את התנהגותה המשתנה ללא הרף של כל מולקולה מבין ביליוני מולקולות הגז הבודדות. לעומת זאת, אפשר לעסוק בכל אוכלוסיית המולקולות ולנתח את התנהגותן בשיטות סטטיסטיות. המהירויות של המולקולות חייבות איפוא להתפלג בהתאם לעקומת ההסתברות הידועה; עיקרון זה של עקומת הסתברות כבר יושם בחקר תופעות שונות זו מזו, כמו גובהם של הבוגרים במדינה, מספר הגורים בשגר, או התפזרותם של גרגרי עופרת בעת ירי מרובה ציד. אפשר לתאר רק את התנהגות האוכלוסיה, לא את זו של פרטים יחידים. אפשר לחשוב על האוכלוסיה כאילו היא מורכבת ממולקולות אידיאליות; הפרמטרים שלהן הם הממוצעים של הערך האמיתי. אפשר לתאר

את תכונות הגז על-ידי מודל מכני טהור של כדורים מתנגשים, ואף אפשר לפרש אנטרופיה במונחים של תנועה מולקולרית. אם אין האדם יכול למנוע את הפחתת האנרגיה, הרי זה משום שאין הוא יכול להבחין בכל מולקולה ומולקולה ולצפות באופייגיה. אולם אפשר בהחלט להעלות על הדעת יצור בעל מוח טוב יותר וחושים דקים יותר, שכשריו, לדברי מקסוול, 'כה מחודדים, עד שהוא יכול לעקוב אחר כל מולקולה במסלולה; יצור כזה, שגם סגולותיו הן ביסודו של דבר סופיות כמו אלה שלנו, יוכל לעשות מה שכרגע איננו בגדר האפשר עבורנו'.¹⁴ צריך לדמיין יצור זעיר או שד זה כמי שיכול 'לראות מולקולות בודדות', ויכול להסיט דלת זוה, שאיננה גורמת כל חיכוך, המותקנת במחיצה המפרידה בין שני מדורים בכלי מלא בגז. כשמולקולה הנעה במהירות מופיעה משמאל לימין, השד פותח את הדלת; כשמולקולה הנעה באיטיות מגיעה, הוא סוגר אותה; ולהיפך. ואז המולקולות המהירות יצטברו במדור שממין, שילך ויתחמם, והמולקולות האיטיות יצטברו במדור השמאלי, שילך ויתקרר. 'ללא הוצאת אנרגיה' יהפוך השד בדרך זו אנרגיה לא שמישה לאנרגיה שמישה. וכך הוא יעקוף את החוק השני של התרמודינמיקה.

אולם במחצית השנייה של המאה ה-19 השתנו תפקידם ומעמדם של ניתוח סטטיסטי ושל תיאוריית ההסתברות. בשביל מקסוול הם היו פשוט כלים המתאימים לניתוח בעיה מסוימת. מאחר שלא היה אפשר לצפות בכל פרטי-יחיד, צריך היה לבחון את האוכלוסיה כולה. לעומת זאת, לבולצמן ולגיבס, ניתוח סטטיסטי ותיאוריית ההסתברות המציאו את הכללים ללוגיקה של העולם כולו. מספרים גדולים נחקרים לאו דווקא משום שאי-אפשר לחקור את היחידות הבודדות, אלא בעיקר משום שהתנהגותן איננה מעניינת כלל. גם אם אפשר היה לנתח לפרטיהן, ולטפל בהן באופן מתמטי, הרי מקרים בודדים לא יוכלו ללמד אותנו יותר מאשר האוכלוסיה בשלמותה. מה יכול להיות היתרון בידיעת המרחק שעושה מולקולה מסוימת? או בידיעה שמולקולה נתונה, המצויה בכלי מלא גז, מתנגשת בדופן בזמן ובמקום נתונים, בתנאים מסוימים? גם אם אפשר היה לנתח את התנהגותה המפורטת של כל יחידה, הרי את מסת התוצאות יוכלו אך ורק לצרף יחד לקבלת החוק

הסטטיסטי השולט באוכלוסיה בשלמותה. אין כל טעם בידיעה, אלו חלקיקים מתנגשים ברגע נתון; מה שחשוב הוא הממוצע של מספר ההתנגשויות וכן ההסתברות של כל חלקיק נתון להשתתף בהתנגשות.

גישה זו שונה כמובן לגמרי מכל אלו שקדמו לה, חוץ מזו של דארטון. שהרי לדעת דארטון, כמו לדעת בולצמן וגיבס, חוקי הטבע אינם תקפים בקרב פרטים יחידים אלא בקרב אוכלוסיות גדולות. אף-על-פי שעשויות להיות אי-סדירויות בהתנהגותה של כל יחידה, הרי, בסופו של דבר, המספרים הגדולים הכרוכים בדבר כופים סדירות על השלם. האנלוגיה שבין שתי דרכי החשיבה נמשכת אף מעבר לזה. ראשית, בעקבות המכניקה הסטטיסטית, כמו בעקבות תיאוריית האבולוציה, רעיון האקראיות הלך והתבסס בלב לבו של הטבע. מימי ניוטון התבססה הפיסיקה על דטרמיניזם נוקשה. התנהגות המולקולות, כמו זו של כל הגופים הנראים, כך נטען, נקבעת בקפדנות על-ידי מערכת גורמים, שהמדע ניסה להכניס לחוקי הטבע. אילו תופעות נצפות היו שבות ומתרחשות בדיוק נמרץ, הרי גם התהליכים שמהם הן הופיעו, תהליכי-היסוד, צריכים להיות כפופים לדטרמיניזם נוקשה. אולם במחצית השנייה של המאה ה-19, כמה מאלה שהיו קרויים חוקי טבע נעשו חוקים סטטיסטיים. [תופעות הטבע] מצייתות בקפדנות לחוקים אלה, רק במידה שמספר הפרטים שמדובר בהם גדול מאוד. את מה שחוקים אלה מנבאים אי-אפשר לנסח במונחים של סיבתיות קפדנית; ניבוי זה הוא אך סביר ואפשר לאמתו רק בגבולות מסוימים, מוגדרים היטב. בתופעות נצפות, הסתברות זו גובלת בוודאות, הואיל וגופים נראים מורכבים ממספר עצום של מולקולות. אולם כשמדובר באוכלוסיות חשובות פחות, סטיות אינן נדירות; הן מה שבולצמן כינה בשם 'תנודות סטטיסטיות'. אם קיים מנגנון מסוים להעדפתן, למשל ברירה טבעית באבולוציה, אזי, בסופו של דבר, ישתלטו היוצאים מן הכלל.

לבסוף, האנלוגיה בין תיאוריית האבולוציה ובין מכניקה סטטיסטית התרחבה וכללה את רעיון אי-הפיכותו של הזמן. באבולוציה, מנגנון הברירה עושה את כל התהליך לבלתי-הפיך:

משעה שווריאנטים מסוימים נבררו בהדרגה, משעה שקבוצה של אורגניזמים פונה לכיוון מסוים, אין שום סיכוי שקבוצה זו תחזור אי־פעם למצבה הקודם. ברירה טבעית עדיין יכולה להדגיש דיפרנציאציה, היא אף יכולה לשנות במעט את הכיוון, אך אין היא יכולה לצעוד לאחור בעקבותיה שלה. בפיסיקה, החוק השני של התרמודינמיקה מכתוב לתופעות את הכיוון; שום אירוע איננו יכול לפנות לכיוון שונה מזה שנצפה, מפני שמשמעותו תהיה ירידה באנטרופיה. שום חלק מחומר היקום איננו יכול לחזור למצב קודם, כפי שאפשר להעלות על הדעת במערכת מכנית טהורה, למשל, שעון דמיוני. לא בעולם האורגני וגם לא בעולם הפיסיקלי הדומם אי־אפשר להריץ לאחור את מעקובות הסרט של מהלך האבולוציה.

אולם בכל זאת נשאר שמץ של מיסתורין בתהליכים שבאמצעותם אנרגיה הולכת ופוחתת; כאילו נדרש לאי־הפיכות רכיב סודי כלשהו, המשותף למנגנונים השונים המצויים בטבע. עם התפתחות התרמודינמיקה הסטטיסטית נעלם הצורך בגורם חבוי. אי־הפיכות ביטאה שינויים בהצבתן של המולקולות, הסדר שלפני הן מאורגנות בגופים. התנועה החד־כיוונית הפכה לתוצאה של תכונה הטבועה במבנה החומר עצמו. שכן בעקבות בולצמן, החוק השני של התרמודינמיקה, המפקח על מצעד היקום ויוצר באופן מאוזן עליה באנטרופיה, היה, בסופו של דבר, רק חוק סטטיסטי. למעשה, הוא נעשה החוק הסטטיסטי העליון, החוק בה"א הידיעה. רוב התופעות הפיסיקליות אך מבטאות את הנטיה הטבעית של אוכלוסיות של מולקולות לעבור מסדר לתהו־ובהו. לדידו של הפיסיקאי, סדר מולקולרי הוא ערך סטטיסטי מדיד. החום האצור בשמש, למשל, הוא מאגר עצום שאפשר להשתמש בו, מאחר שאין הוא מפוזר באופן אחיד בכל היקום, אלא נשאר מרוכז במרחב מוגבל. בחלוף הזמן, חום זה נוטה להתפזר באופן ספונטני, והטמפרטורה נוטה להיות אחידה בכל היקום. זה שווה־ערך לעליה באי־סדר או באנטרופיה. חום נוטה לזרום מהם לקר, לא מפני שחוק סודי אוסר עליו לזרום בכיוון הנגדי, אלא רק משום שזרימה נגדית – קר להם – סבירה פחות בסדרי גודל רבים מאוד: לעולם אין היא מתרחשת למעשה, אם כי תיאורטית אין זה כלל בלתי־אפשרי.

לדבר על מולקולות העוברות ממצב סביר פחות למצב סביר יותר, הרי זה כמו לדבר על אבנים של אנדרטה שהפכה לגל חורבות בעקבות רעידת אדמה, או על ספרים שסודרו בקפדנות על מדפי הספרייה ואחר־כך הונחו בערבוביה עלידי קוראים אדישים. התרמודינמיקה הסטיטיסטית קובעת: כשטורפים חפיסת קלפים, הם יעברו קרוב לוודאי מסדר לתוהו־ובוהו. אולם אין היא אומרת, שההיפך הוא בלתי־אפשרי. זה יכול לקרות, ואכן חייב לקרות, לאחר מספר נסיונות גדול דיו. אולם כדי שדבר זה יקרה, נדרש כל־כך הרבה זמן, עד שמקרים חריגים כאלה אינם יכולים להפריע למצעדו הכללי של היקום קדימה. שטף האירועים זורם לקראת מה שהוא סביר יותר מבחינה סטיטיסטית. לדידו של דארון, האי־הפיכות של האבולוציה נובעת מן האי־אפשרות של חזרה למצב מוקדם אצל אורגניזמים שכבר מחויבים ללכת בנתיב התמחות מסוים. לדידו של בולצמן, האי־הפיכות התרמודינמית נובעת מן האי־אפשרות של המולקולות ביקום לחזור למצב קודם, משעה שעברו באופן ספונטני מסדר לא־יסדר.

כל גישתה של המאה ה-19 השתנתה עלידי נקודת־המבט החדשה, שקיבלה השראה מהמכניקה הסטיטיסטית. קודם־כול, המכניקה הסטיטיסטית גזרה את תכונות הגופים ממבנה החומר עצמו. עם גיבס, הניתוח הסטיטיסטי יושם לא רק להתנהגות של אוכלוסיות גדולות, אלא גם לכל 'המערכות השמרניות' שיש להן דרגת חופש כלשהי. היא הרשתה לנתח את פיזורם של מצבים ושל תנעים, התואם את האנרגיה של מערכת נתונה – פיזור שכלל את כל המערכת אם היא תיפקדה זמן ארוך דיו. ברוב האירועים המתרחשים בעולם הפיסיקלי אפשר היה לטפל בדרך זו: ריאקציות כימיות, מהירותן, השתנותן בגלל טמפרטורה, תהליכי ההיתוך והאידי, חוקי לחץ הגז, ועוד, כל אלה תופעות המבוססות על אותה היפותזה בדבר שינויים הקורים בסדר המולקולרי. כולם נעשו כפופים לחוקים סטיטיסטיים.

עם המכניקה הסטיטיסטית שוכלל עד שלמות הכלי המתמטי שאיפשר לתקור את המבנה והאבולוציה של כל מערכת שכרוכים בה מספרים גדולים. עתה אפשר היה לטפל במושאים ובאירועים

רבים, ואפילו בתכונות רבות, שחמקו עד כה מגיתוח, בה במידה שאפשר היה למספרם ולסווגם במערכת בלתי־רציפה. למעשה, סוג זה של גיתוח סטטיסטי מבוסס לגמרי על פיזורן של יחידות בדידות. בין אם אי־רציפות זו קיימת באופן טבעי, כמו באוכלוסיות של יחידות, ובין אם הוכנסה לשימוש על־ידי שיטות המדידה, המצריכות בחירה בין שני ערכים מגבילים, היא מהווה תנאי הכרחי לסוג זה של גיתוח. שכן דברים בלתי־רציפים אפשר למנות בעזרת המושג המתמטי הישן־נושן והפשוט ביותר – מספרים שלמים. היכולת למנות מספרים שלמים היא האמנות של יישום השיטה הסטטיסטית. ככל שישגדל מספר המקרים הנצפים, כן תגדל הדירותן של התוצאות. אולם שיטה סטטיסטית היא כה בטוחה, היא מתפקדת בדיוק כה רב, עד שאפשר להתאים את התנאים באופן שיידרשו רק מספר מוגבל של תצפיות. בעקבות מקסוול יושמה השיטה הסטטיסטית בחקר תופעות פיסיקליות, בעיקר ככלי עזר. אחרי בולצמן וגיבס התרחבה השיטה בהדרגה למיגוון תחומים, אפילו כאלה שבמבט ראשון דומה היה שקשה, אם לא בלתי־אפשרי, להכניס בהם את האי־רציפות הנדרשת. מכאן ואילך התאפשר לגזור תוקים מעשיים מתופעות שהדטרמיניזם שלהן איננו ידוע. במקום לחפש מה הן הסיבות הגורמות לאירועים מבודדים, התאפשר מעתה לצפות במספר רב של אירועים באותה קבוצה, למיין אותם, לאסוף את התוצאות ולאחר מכן לחשב את הממוצעים בעזרת כללים אמפיריים. וכך יכלו לנבא אירועים עתידיים באותה קבוצה, אמנם לא בוודאות, אך בהסתברות שלעיתים קרובות מאוד היא בגדר ודאות. גיבויים אלה היו תקפים רק למכלול האירועים, ללא פרטים ויוצאים מן הכלל. למעשה, אחד האופיינים של השיטה הסטטיסטית הוא התעלמותה, במכוון ובשיטתיות, מפרטים. כמעט אין זה חשוב אם כל גסיבה מתוארת לפרטי פרטיה, או אם משיגים כל פרט־מידע אפשרי; אין זו המטרה. המטרה היא לקבל חוק שהוא מעבר למקרים פרטיים.

לבסוף, התרמודינמיקה הסטטיסטית שינתה לגמרי את דרך ההסתכלות בטבע, בעיקר משום שהפגישה יחד סדר ומקריות – שני מושגים שעד אז לא התיישבו זה עם זה – והקצתה להם אותו מעמד, כלומר שהם כמויות מדידות שיש ביניהן קשר. כל טווח

הכוחות, הדחפים, השינויים והפוטנציאלים, שלמרות הכול עדיין דבק בהם טעם מיסתורי ושרירותי, הורדו לדרגת גורמי-עזר. הם ייצגו בפשטות היבטים שונים של מנגנון אוניברסלי מורכב יותר, שהתגלה כחוק כללי של היקום: הנטיה הטבעית של הדברים לעבור מסדר לא-יסדר בהשפעתה של מקריות שאפשר לחשב אותה. אין חוק זה בא לתת הסבר סיבתי לאירועים; אין הוא אומר מדוע הם מתרחשים, אלא אין הם מתרחשים. מאז, עצם רעיון הסיבתיות איבד משהו ממשמעותו, ואפילו משהו מהעניין שבו. וכך נעלם רוב המיסתורין שעדיין אפף את תמונת הטבע במחצית הראשונה של המאה ה-19. תופעות רבות, שונות לגמרי ובלתי-מוסברות, מציגות לעתים קרובות אופיינים דומים, מאחר שהן מבוססות, בדרך זו או אחרת, על מנגנון משותף. זה נכון לא רק בתופעות שחקרה הפיסיקה. כך היה בשלהי המאה ה-19 ובראשית המאה ה-20 באסטרונומיה, גיאולוגיה, ביולוגיה, מטאורולוגיה, גיאוגרפיה, היסטוריה, כלכלה, פוליטיקה, תעשייה ומסחר; למעשה, בתחום נרחב של פעילויות אנושיות ואפילו בפרטי הפרטים של חיי היום-יום.

לא נגזים אם נאמר, שדרך ההסתכלות שלנו בטבע כיום עוצבה במידה רבה על-ידי התרמודינמיקה הסטטיסטית, ששינתה הן את מושאי המחקר המדעי והן את נקודת-המבט של המדע. היא גם חוללה שינוי בעמדה שהובילה בתחילת המאה ה-20 להולדת עולם הפיסיקה המודרנית: עולם של יחסות ושל אי-יזדאות, המציית לחוקים הקוואנטיים ולתיאוריית האינפורמציה, עולם שבו חומר ואנרגיה אינם אלא שני היבטים של אותו דבר עצמו. בעזרת התרמודינמיקה הסטטיסטית הופיעו מדעים חדשים – כמו כימיה פיסיקלית, המבססת את התכונות הכימיות של גופים על המבנה הפיסיקלי שלהם. ושוב, בזכות התרמודינמיקה הסטטיסטית גם יכלה עריכת ניסויים להתרחב לתחומים מגוונים ביותר בביולוגיה; ראשית, משום שריאקציות כימיות, המתרחשות ביצורים חיים, מצייתות לחוקים השולטים בחומר באופן כללי; אך גם, ומעל לכול, משום שניתוח סטטיסטי שינה את הביולוגיה למדע כמותי. בשלהי המאה ה-19 כבר לא היה חקר היצורים החיים מדע של סדר, אלא גם מדע של מדידה.

עמדתם של דארווין, בולצמן וגיבס לא ביטאה רעיון שהיה נחלתם של אנשים ספורים, אלא נטיה שהלכה וגברה במחצית השנייה של המאה ה-19, כפי שמדגימה עבודתו של מנדל. במשך מאות שנים הלכו והצטברו תצפיות על התורשה. ובכל זאת לא היתה התורשה, במובנו המובהק של המונח, מושא־חקירה אמיתי. המאה ה-19 כבר לא היתה להוטה לאמת את קיומן של מפלצות אגדיות; היא נטשה את הנסיונות להכליא מינים שונים. אף־על־פי־כן, עדיין נעשו הצלבות בין זנים שתכונותיהם האופייניות נבדלות זו מזו. התורשה היתה בעיקרה תחום עיסוקם של מטפחים של בעלי־חיים וצמחים. למעשה, בכל המאה ה-19, כורח כלכלי הוא שדחף להגדיל את היבולים החקלאיים ואת העדרים, וגם פיתוח של זנים, המותאמים לתנאים מקומיים מיוחדים. צריך היה להגביר את הייצור לא רק על־ידי הגדלת התנובה של בעלי־חיים וצמחים ליחידת שטח, אלא גם על־ידי השבחת איכותם. הניסויים המעשיים בוצעו בפרדסים ובשדות, בכורות ובלולים. לאחר כל הצלבה, די היה לבחון בדקדקנות את הצאצאים על־פי כל סימניהם המוכרים, ולתארם באופן מושלם, עד כמה שאפשר, מבלי להשמיט שום פרט. לא היה אפשר להבחין במדויק ברוב התכונות האופייניות שנבחרו, מאחר שהן התערבו זו בזו בסדרה ארוכה, כמעט אינסופית, של טיפוס־ביניים. למעשה, הצלחת המבצע נשפטה לפי מידת התמזגותן של התכונות האופייניות של שני ההורים בבן־הכלאיים. וכך אפשר לראות תכונות ששבו והופיעו מחדש בדורות עוקבים. חלקן נעלמו לזמן־מה, אך צצו שוב כעבור זמן. נְאוֹדִין, למשל, השווה את האחידות של בני־הכלאיים מהדור הראשון, עם 'הערבוביה הקיצונית של הצורות בדור השני: חלקן דמו לאב, אחרות לאם, כאילו היו בני־הכלאיים פסיפס חי',¹⁵ שאי־אפשר להבחין בין רכיביו בעין בלתי־מזויגת. גְרֶטְנֶר הבחין בהטרוגניות רבה בין צאצאי בני־הכלאיים: לחלקם היו צאצאים טהורים, לאחרים צאצאים מעורבים. דומה שהסגולה העיקרית של התורשה היא מורכבותה.

מנדל ייצג את נקודת־ההיפגש של שני זרמים אשר הובילו לכינונו

של מדע התורשה: ידע מעשי בחקלאות וידע תיאורטי בביולוגיה. בהיותו בן־איכרים, גילה עניין באבולוציה. בנעוריו ראה את אביו שותל, מצליב ומרכיב. כל חייו תהה כיצד נוצרים המינים. הוא קיבל רשות לגדל צמחים מעטים בגנו של המנזר, שבו חי. אולם בעיקר הפליא את מנדל טבעה של התורשה, אשר, כך התברר, היתה חזקה ברוכב יותר מאשר בכנה שעליה הורכב, כלומר, בסביבה שלו. גם הוא החל לגדל בני־כלאיים, אך לא כדי לשפר את התנובה, אלא כדי לעקוב אחר התנהגות התכונות האופייניות דור אחר דור. גישתו של מנדל היתה שונה לגמרי מזו של קודמיו. 'בין כל הניסויים, הרבים לאין ספור, שנעשו', כתב,

אף לא אחד נעשה בהיקף ובדרך שיאפשרו לקבוע את מספר הצורות השונות של צאצאי בני־הכלאיים, או לסדר את אותן צורות בוודאות בהתאם לדורותיהן השונים, או להיות בטוחים באופן ברור מהם היחסים הסטטיסטיים ביניהן.¹⁶

בגישתו של מנדל היו שלושה יסודות חדשניים לגמרי: תכנון־מראש של הניסויים ובחירת החומר המתאים; הכנסת אירציפות ושימוש באוכלוסיות גדולות, משמע, שאפשר היה לבטא את התוצאות באופן מספרי ולעבד אותן באופן מתמטי; שימוש בסימול פשוט, שאיפשר לעבור כל העת מניסוי לתיאוריה, ולהיפך.

ראשית, מנדל בחר את חומר החקירה שלו בזהירות רבה. הוא ניסה כמה צמחים לפני שהחליט להשתמש באפונה. הוא השתמש בזנים טהורים; דבר שהבטיחו לאתר שגידלם כמה שנים תחת תנאים קפדניים. הווריאנטים שעמד להכליא חייבים היו להיות שונים זה מזה רק במספר מוגבל של מאפיינים, ולא דווקא בכלם. מנדל סבר, שאין לכלול בניסוי את התכונות האופייניות 'שאינן מאפשרות הפרדה חדה ובטוחה, שכן הבדל שטבעו הוא "פחות או יותר" קשה לעתים קרובות להגדירו'.¹⁷ צריך להשאיר רק את אותם מאפיינים שאפשר להבחין בהן בצורה חד־משמעית, כמו צורתם וצבעם של זרעים ותרמילים, סדר הפרחים על הגבעול וכו'. כדי להימנע כבר מלכתחילה ממורכבות שאי־אפשר לשלוט בה בעת עיבוד הנתונים

על אודות בני־הכלאיים, צריך להתעלם מפרטי פרטים ולצמצם את המחקר למספר קטן מאוד של תכונות אופייניות: תחילה אחת, אחר־כך שתיים, אחר־כך שלוש, ולהשיגו בכל פעם להבחין בכל הצירופים האפשריים בצאצא. כדי למצות את כל הצירופים האפשריים, יש לשמור על שני תנאים: ראשית, צריך לערוך את הניסויים בהיקף גדול דיו, כך שאפשר יהיה להתחשב רק באוכלוסיות ולהתעלם מפרטים־יחידים; שנית, צריך לעקוב אחר התנהגות התכונות האופייניות לא רק בדור הראשון, אלא בסדרה ארוכה של דורות רצופים.

מעצם טיבו, טיפוס זה של ניסוי הוביל לדרך חדשה לגמרי של הצגת התוצאות. בגלל האירוציפות שהוכנסה במתכוון להבחנה בין תכונות אופייניות, די היה למנות בכל דור את הפרטים־היחידים של כל אחת מהקבוצות האפשריות. באופן זה, כל קבוצה התבטאה במספר שלם, וככל שנרחב היה היקף הניסוי, כן גבוה היה מספר זה. מספרים אלה אפשר היה לעבד בדרך סטטיסטית, ולקבוע את הקשר ביניהם. המספרים הופיעו בדרך־כלל ביחסים פשוטים. וכך, בהצלבות שבין זנים השונים זה מזה בתכונה אופיינית אחת, בני־כלאיים של הדור הראשון דומים רק לאחד מההורים, לעולם לא להורה השני: תכונתו האופיינית של האחרון היא נשלטת (רצסיבית) בהשוואה לזו של ההורה הראשון, או ההורה השולט (דומיננטי). בדור הבא, הצאצאים של בני־כלאיים אלה, שתי הצורות, הנשלטת והשולטת, מופיעות ביחס של 1:3 לערך. וכך, לפי המצב, אם נושאי התכונה האופיינית השולטת יוצרים צאצאים הזוהים להם עצמם או אם במקום זה הם ממשיכים ליצור צורות נשלטות, אפשר לחלק אותם לשתי קבוצות נוספות ביחס של 1:2. כשהזנים המוכלאים שמשתמשים בהם שונים זה מזה בשתי תכונות אופייניות ולא באחת, כל בני־הכלאיים הם שוב זהים. בדור הבא, הצאצאים של בני־הכלאיים מתחלקים לארבע קבוצות ביחסים 1:3:3:9 לערך. שלוש מהקבוצות האלה יכולות להתחלק שוב, כל אחת לשתיים, בדורות הבאים. ומספר הקבוצות עולה בהתאם למספר התכונות האופייניות שבוחנים בניסוי. ובמלותיו של מנדל,

בצאצא של בני־הכלאיים, שבהם מצורפות כמה תכונות אופייניות שונות

זו מזו בעיקרון, נראים האיברים (terms) של סדרת הצירופים, שבה מתאחדות הסדרות ההתפתחותיות לכל זוג של תכונות אופייניות מובחנות... אם n מייצג את מספר התכונות האופייניות המובחנות בשני הגזעים המקוריים, אזי 3^n נותן את מספר האיברים (terms) של הסדרה המצורפת, 4^n את מספר הפרטים היחידים הנמנים עם הסדרה, ו- 2^n את מספר האיחודים שנשארו קבועים.¹⁸

במלים אחרות, התכונות האופייניות השונות מועברות באופן בלתי-תלוי. באוכלוסיות די גדולות, אפשר לנבא את פיזור התכונות האופייניות.

ולבסוף, הבחירה הבינארית הפשוטה בין שתי צורות של תכונה אופיינית מאפשרת ייצוג סמלי פשוט. לפי מנדל,

אם נאמר ש-A מציין את אחת משתי התכונות האופייניות הקבועות, למשל את השולטת, a מציין את הנשלטת, ו- Aa את צורת בן-הכלאיים, שבו שתיהן מאוחדות, הרי הביטוי $A+2Aa+a$ מראה את האיברים בסדרה עבור הצאצאים של בניה הכלאיים של שתי תכונות אופייניות מובחנות.¹⁹

הפירוש הסמלי של התוצאות נעשה בדרך כלשהי לציר המחבר תיאוריה וניסוי. הוא מאפשר לנסח בקלות היפותזות מתוך הפיזורים הנצפים; והוא מוליך ישירות לניבויים, שאפשר לבחון אחר-כך בניסוי. בדרך זו, מהיחסים הנצפים בין צירופי התכונות האופייניות אפשר להסיק מסקנות על ההיווצרות וההרכב של אבקת פרחים ותאי ביצית. קו הצאצאים נשאר טהור וקבוע רק אם האורגניזמים באים מאבקה ומתאי ביצית, הנושאים את אותן תכונות אופייניות, למשל A. אין כל סיבה לחשוב, שמנגנון אחר פועל בהיווצרות בן-כלאיים, למשל Aa. מאחר ששתי הצורות של אותה התכונה האופיינית A ו-a נוצרות באותו צמח בן-כלאיים, או אפילו באותו פרח, מוכרחים להסיק שבשחלות בן-הכלאיים Aa נוצר מספר שווה של תאי ביצית מטיפוס A ומטיפוס a, ובמאבקים נוצר מספר שווה של גרגרי אבקה מאותם שני טיפוסים. ובניסוח כללי יותר, כאשר כרוכות בדבר כמה תכונות אופייניות, מספר

הסוגים של תאי אבקה ותאי ביצית הצריכים להיווצר בבן־הכלאיים יהיה כמספר הצירופים בצאצא. הניסוי מאשר דבר זה. לפי מנדל, בבן־כלאיים Aa ,

הרי זה רק עניין מקרי, איזה משני סוגי תאי האבקה יתאחד עם כל תא ביצית נפרד. אולם לפי חוק ההסתברות תמיד יקרה, בממוצע של מקרים רבים, שכל צורה של אבקה, A ו- a , תתאחד באותה תדירות עם כל צורה של תא ביצית A ו- a ; כתוצאה מכך, בעת ההפריה, אחד משני תאי אבקה A ייפגש עם תא ביצית A , והאחר עם תא ביצית a , ובאופן דומה תא אבקה a יתאחד עם תא ביצית A , והאחר עם תא ביצית a .²⁰

את תוצאות ההצלבות האלה אף אפשר להציג בגרף פשוט. אך כדי לייצג את התכונה האופיינית של פרטי־יחיד, כבר לא די בסמל פשוט; דרושים שני סמלים, שמנדל כתב יחד בצורה של שבר. בצאצא של בן־הכלאיים A/a נוצרים ארבעה צירופים: A/a , A/A , a/a , a/A . רק הראשון והאחרון, המתאימים לתכונות האופייניות של ההורים, הם טהורים. מאחר שצורה A שולטת על צורה a , לשלושת הצירופים הראשונים יש תכונה אופיינית הנראית בתצפית, אם כי הם בעלי מבנה שונה, המתגלה בצאצאיהם; מכאן היחס 1:3 בין הצורה הנשלטת לצורה השולטת בדור השני. ערכים אלה מייצגים רק את התוצאה הממוצעת של ניסויים רבים בהפריה עצמית של בני־כלאיים. בפרחים או בצמחים יחידים, ערכי הסדרה שונים לעתים קרובות מן הממוצע. לפי מנדל,

הערכים הנפרדים נתונים בהכרח לתנודות... את היחסים האמיתיים בין המספרים אפשר להבטיח רק על־ידי ממוצע המתקבל מסכומם של מספר גדול ככל האפשר של ערכים יחידים; ככל שגדול המספר, כן מסולקים תוצאים שהם רק מקריים.²¹

עם מנדל, תופעות ביולוגיות רכשו לפתע את קפדנות המתמטיקה. לוגיקה פנימית שלמה הוכתבה לתורשה על־ידי מתודולוגיה, עיבוד סטטיסטי וייצוג סמלי. חוץ מהאפיזודה של היווצרות־מוקדמת, כמעט לא השתנו הרעיונות על מנגנון התורשה במשך אלפיים שנה. תיאוריית האבולוציה תבעה תהליך היכול לשחזר את מאפייני ההורים בצאצאים, ויחד עם זאת לשנותם במקצת. מה שבתקופת

מנדל ראה דארווין כ'פנגנזה' דמה מאוד למה שכבר העלו בדעתם היפוקראטס ואריסטו, ומאוחר יותר מופרטואי ובופון. על-פי תיאוריית הפנגנזה, כל מיקטע של הגוף, כל תא, יוצר נבט קטן של עצמו, או 'גמול', הנשלח אל תאי הנבט, ומוטל עליו לייצר את אותו מיקטע בדור הבא. יתרונה של תיאוריה זו היה בכך, שהיא הרשתה את אפשרות הופעתן של וריאציות ספונטניות, שאינן מושפעות על-ידי גורמים חיצוניים, כמו גם הכנסת תכונות אופייניות נרכשות לתורשה. דארווין, לא יותר ממופרטואי ומבופון, לא ערך הבחנה בין מה שמרכיב את גוף ההורים, את זרעם ואת גוף הצאצא. שלוחים על-ידי ההורים, אותם רכיבים עברו לזרע כדי ליצור את הצאצא. לפיכך יכלה התורשה להיות ממוקמת רק בתוך הארגון עצמו, במבנה זה מסדר שני, אשר לו יוחסו כל המבנים והתיפקודים הנתפשים של היצור החי. מנדל ראה את התורשה בדרך שונה לגמרי – בהקשר לתופעות שאפשר לנתחן במדויק. התפלגויות סדירות, שליטה של תכונות אופייניות, התמדת מצב הכלאיים – אף אחת מאלה איננה עולה בקנה אחד עם פנגנזה. כדי לייצג מאפיין מוכר בפרטי-יחיד, דרושים שני סמלים. סמל אחד איננו יכול איפוא להתאים לתכונה אופיינית נצפית או לשליח שלה, הגמול. מכאן הצורך להבחין בין מה שנראה, התכונה האופיינית, ובין משהו נוסף הנמצא ברקע של התכונה האופיינית; בין מה שמדע הגנטיקה במאה ה-20 מכנה פּוּנְטִיפּ וּגְנוּטִיפּ. גנוטיפ קובע פנוטיפ, אך מתבטא בו רק בחלקו. תכונות אופייניות נצפות רק מהוות עֵדוּת לנוכחותם החבויה של חלקיקים או של יחידות שמנדל כינה בשם 'גורמים'. אלה אינם תלויים זה בזה, וכל אחד קובע תכונה אופיינית נצפית אחת. הצמח קיבל שתי דוגמאות מכל גורם, אחת מכל הורה, אם דרך תא האבקה או דרך תא הביצית. מה שמועבר על-ידי התורשה איננו איפוא ייצוג מלא של הפרטי-היחיד וגם לא סדרה של שגרירים מכל חלקי הגוף של ההורים, המסודרים אחר-כך מחדש בצאצא כמו שאבנים מסודרות בפסיפס. זהו אוסף של יחידות בדידות, שכל אחת שולטת בתכונה אופיינית אחת. כל יחידה יכולה להתקיים במצבים שונים, הקובעים את הצורות השונות של התכונה האופיינית המתאימה. מאחר שכל אורגניזם מקבל מערך שלם של יחידות מכל הורה, היחידות מסתדרות מחדש באופן מקרי במשך הדורות. הארגון שאנטומאים, היסטולוגים ופיסולוגים חקרו,

אותו מבנה מסדר שני, אשר לו יוחסו כל הצורות והתכונות של יצור חי, מעתה כבר לא היה די בו כדי להסביר את התורשה. מבנה מסדר גבוה יותר צריך היה להתקיים, חבוי עוד יותר, קבור עמוק יותר בתוך הגוף. זהו מבנה מסדר שלישי, שבו ממוקם הזיכרון של התורשה.

לפיכך, ממש אותה עמדה שהובילה את בולצמן לקשור תכונות של גופים למבנה הפנימי שלהם, כדי לגזור את החוק הקובע את האבולוציה של החומר, היא שהעמידה לרשות מנדל את האמצעים לניתוח התורשה ולידיעת חוקיה. בשני המקרים, יסודות בלתי־רציפים מעורבים בעניין. בשני המקרים, אין לנבא את התנהגותו של יסוד יחיד, הנתון ביד המקריות. ובשני המקרים, עיבוד סטטיסטי של אוכלוסיות גדולות מאפשר לחלץ סדר מן המקריות. כשמדובר בגורמי תורשה, כמו גם במולקולות גז, התנהגותה של כל יחידה ויחידה איננה חשובה. הצירוף של תכונות אופייניות בצמח מסוים לא עורר עניין במנדל, כשם שנתיבה של מולקולה מסוימת לא עורר עניין בבולצמן. מחיר זה צריך היה לשלם לפני שתורשה יכולה היתה להיות מושא הניתוח. מעכשיו אפשר היה להחליף מצבי־רוח, כוחות נעלמים וכוונות מיסתוריות, אשר מן העת העתיקה והלאה עיצבו כמדומה את התכונות האופייניות של היצורים החיים, ובמקום זה לדבר על תומר, חלקיקים וחוקים. וכך השתנה לגמרי כל ייצוגם של האורגניזמים החיים. על־פי היגיון, שינוי זה צריך היה להתרחש בכל תחומי העשייה הביולוגית. למעשה, דבר זה לא קרה כלל. המקרה של מנדל מדגים היטב שאי־אפשר לעקוב אחר היסטוריה ליניארית של רעיונות, לגלות את רצף השלבים שההיגיון היה הולך בעקבותם. שהרי למרות ההתאמה בינה לבין הפיסיקה בימיו, לא היתה לעבודתו של מנדל שום השפעה על דרך המחקר הביולוגי של בני־זמנו. המאה ה-20 היא שהכתירה את מנדל בתואר אבי הגנטיקה, והפכה את מאמרו הראשון לתעודת הלידה של מדע זה. עד סוף המאה, עבודתו נשארה בלתי־ידועה או זנוחה, אם כי האב גרגור מנדל לא היה בלתי־מוכר לחוקרים בני־זמנו. הוא היה אולי חובב, אך הוא היה בקשר עם רבים מהביולוגים המפורסמים ביותר בזמנו. הוא התכתב זמן רב עם כמה מהם, ובמכתביו תיאר את ניסוייו בפרוטורוט; אך

הוא לא עורר את תשומת־לבם. כשבאחד מערבי פברואר 1865 קרא מגדל את הרצאתו הראשונה לפני חברי האגודה למדעי הטבע בברנו, נכחו ב'ריאל שוֹלֶה' כארבעים איש, ביניהם חוקרי־טבע, אסטרונומים, פיסיקאים וכימאים – במלים אחרות, קהל של משכילים. מגדל דיבר כשעה על הצלבת אפונים. הקהל גילה אדיבות כלפי המרצה עצמו. אם כי הופתעו לשמוע שאריתמטיקה וחישובים של הסתברויות קשורים לסוגיית התורשה, הם הקשיבו בסבלנות ומחאו כפיים בנימוס. כשסיים מגדל את דיווחו, הלכו כולם הביתה מבלי שהביעו שמץ של סקרנות. מגדל כתב אל נָגְלִי: 'כצפוי, הדעות היו חלוקות; אולם, עד כמה שידוע לי, איש לא החליט לערוך ניסויים חוזרים.'²² כעבור שנים מספר, כשמת מגדל, חלקו לו כבוד על תרומותיו לחברה, אך התעלמו ממנו כמדען. בתחילת המאה ה-20, כשעבודתו 'נתגלתה־מחדש', התברר בדרך־כלל שדפי כתב־העת, שמאמרו של מגדל התפרסם בו, עדיין היו מחוברים זה לזה.

אם כן, איך אפשר לומר ששכלו של האדם רק מצפה לקלוט רעיונות חדשים ולנצלם? איך אפשר לחשוב, שהתפתחות המדעים מודרכת על־ידי התכליתיות של הלוגיקה בלבד? הלוגיקה יכולה לתמרן רק בתחום המוגדר על־ידי גקודת־המבט של התקופה; היא יכולה לנתח רק את אותם אובייקטים שנמצאו ראויים לחקירה. מדע הגנטיקה לא יכול היה להתפתח לפני שהתחולל בסוף המאה ה-19 שינוי קיצוני בחקר התא. ניתוח מבנה התא צריך היה להשתכלל, לגלות את הכרומוזומים ואת תנועותיהם, שהן סדירות כתנועות של ריקוד בלט; הוא הדין בניתוח תפקידו של התא, שהחליף את מנגנון הפנגנוזה ב'תא הנבט', קוֹרְתָא (cell-line) השמור אך ורק למטרת רביה, מוגן מכל התהפוכות המשפיעות על הגוף.

ריקוד הכרומוזומים

אחרי אמצע המאה ה-19 הפך התא למוקד המחקר בביוֹלוגיה. התא כבר לא היה יחידת המבנה של כל האורגניזמים החיים בלבד, או הגבול הסופי של הניתוח האנטומי, אלא היה למקום שבו נפגשות

כל פעילויות האורגניזם – 'מושב החיים', כדברי וירכוב. בתא מתקיימות ריאקציות מטבוליות ונוצרות המולקולות האופייניות של היצורים החיים. במהלך התמיינות תאים נוצרים איברים ונבנה גופו של הבוגר. חלוקת-תא (cell division) מנציחה את הארגון. אין תא שאיננו מופיע מתא אחר. רביה מתממשת על-ידי 'הינץ' של הפרט-היחיד, כדברי הקל. תופעות התורשה הן אכן ביטוי של תופעות הגדילה, כפי שמודגם בבהירות באורגניזמים חד-תאיים, המכפילים את עצמם בדרך של התחלקות. כל אורגניזם קטן גדל עד שהוא יכול להתחלק לשני חלקים זהים, לא רק בגודל אלא גם בצורה ובמבנה. קל להבין מדוע הצאצא דומה להורה שלו: הוא מיקטע של ההורה. המצב איננו שונה באורגניזמים רב-תאיים, הנוצרים על-ידי הכפלתו של תא יחיד ראשוני, הביצית. אפשר להשוות את גופו של אורגניזם כזה למושבה של תאים, שבה דורשת חלוקת-העבודה התמחות של היחידות. כלומר, תאים מסוימים מסוגלים לבצע רק תיפקודים ההכרחיים לנשימה, למשל, ואחרים רק תיפקודים של רביה, תנועה או עיכול. אם מדובר באורגניזם חד-תאי או באורגניזם מורכב, התורשה היא תמיד תוצאה של המשכיות התא. לכן התא עצמו הוא האתר שבו מתרחשות הריאקציות הכימיות, הנותנות לאורגניזם את יחודיותו, ובו מצויה המערכת המעניקה לו את היכולת ליצור את בן דמותו. תאי הנבט מכילים את הרישום הגס של האורגניזם שטרם נולד, לא בצלמו, אלא באופן פוטנציאלי. טיפות אלו של חומרים אלבומיניים מכילות כבר את הדגם המיוחד של כל התאים של האורגניזם העתידי. המחקר התמקד איפוא בתיפקודיות ובחלוקה של התא.

לא היתה כאן שאלה של בניית זואולוגיה של תאים; של הגדרת מקומן, יחסיהן ותכונותיהן של כל היחידות המרכיבות אורגניזם; של למידת שיוכם המדויק; או של בניית מפה מפורטת שלהם בגוף. למעשה, היה רק סיכוי מועט שאי-פעם תתגלה רשת התאים והסיבים באורגניזם מורכב. כי לתאים של בעל-חיים אמנם יש צורות, אתרים ומטלות שונים, אך הם בנויים על-פי אותו מודל. למרות רבגוניותם, הם מציגים אותו מבנה. יהיו מוצאו וטבעו אשר יהיו, התא הוא תמיד גופיץ נוזלי-למחצה, המורכב מחומר אלבומיני, פרוטופלסמה. הוא מכיל תמיד גרעין קטן, עגול פחות או יותר, שגם

הוא עשוי מחומר אלבומיני. לעתים קרובות הוא מוקף בקרום ולפעמים הוא מלא בחלקיקים. ארגון התא נשלט על-ידי נוכחותם של שני רכיבים עיקריים. 'גרעין ופרוטופלסמה', אמר הקל, 'גרעין-תא פנימי וחומר-תא חיצוני הם שני החלקים העיקריים של כל תא אמיתי. כל השאר הוא משני ונלווה.'²³ צריך איפוא להקצות תפקידים לכל אחד משני המרכיבים האלה ולהגדיר את הרכבם ותיפקודם, כדי לזהות מהו הדבר שהתא מעביר לצאצאיו, כדי שייוצרו בדמותו.

ציטולוגיה, המדע המנסה למפות את מבנהו של חלל התא, מאחד תחומים שונים מאוד זה מזה: פיסיולוגיה, התפתחות עוברית, תורשה ואבולוציה, באותה מידה כמו מורפולוגיה. אחדותו של מדע זה נובעת מן השיטות, אוצר-המלים והחומר שהוא משתמש בהם. בשלהי המאה ה-19 השיג מיקרוסקופ האור את כושר-ההפרדה המרבי שאיפשרה הפיסיקה. אולם על-ידי שימוש בתומרים הצובעים באופן ברירני מבנים תאיים מסוימים, הגדילו הציטולוגים את אמצעי ההבחנה והזיהוי; בדרך זו הם אף השיגו תובנה בדבר ההרכב הכימי של מרכיבי התא: הגרעין, למשל, נצבע בקלות על-ידי חומרים בסיסיים מסוימים. בהדרגה הלך והתבלט הנוף שגילה המיקרוסקופ. תיאורו המפורט הצריך שפה חדשה. בשלהי המאה נוצר מילון חדש שלם על-ידי צימודם של שורשים יווניים ולטיניים או אפילו הכלאתם. בתוך זמן קצר כבר לא הצליח אדם שלא מקרב בעלי המקצוע להבין את שפתו של הביולוג. קלות צביעתו של הגרעין, לדוגמה, צוינה על-ידי הרדיקל 'כרום'. מכאן 'כרוֹמָטִין', כפי שכינה פלמינג את החומר המוכל בגרעין; 'כרומוזומים', כפי שכינה וֶלְדִייר את הסיבים הנראים בתוכו; 'כרומוזומים', כפי שכינו בְּלָיֵאני וגם וֶן-בְּנֶדֶן את הרצועות היוצרות רצועות-צולבות על הכרומוזומים; כרומטידות, כרומידים, כרומידיוגמיה, כרומיולים, כרומוצנטרים, כרומוגומות, כרומופלסטים, כרומוספירות, וכן הלאה. דיוקו של הידע השתקף בדיוקם של השמות. ולבסוף, הציטולוגיה אופיינה על-ידי החומר שהשתמשה בו. מאחר שלא ביקשה לנתח את האופיינים של טיפוסי תאים מיוחדים, אלא את הסגולות המשותפות לכל התאים, היה לה חופש בחירה מלא. לפיכך יכלה להתמקד במספר קטן של

אורגניזמים בעלי יתרונות מיוחדים לתצפית וניסוי. באורגניזמים מועדפים אלה התמקדה תשומת-לבם של מומחים בארצות שונות, של ביולוגים מתחומי התמחות ועניין שונים. כפי שהסתבר, שני סוגי חומר התאימו במיוחד. ראשית, אורגניזמים חד-תאיים, פרוטיסטה, שמחזור הרבייה שלהם דומה לזה של אורגניזמים רב-תאיים: אך במקום להתאחד וליצור גוף אחד, נשארים תאי הפרוטיסטה בנפרד, וחיים באורח עצמאי. כמו שאמר דיכרד הרטוויג, 'פרוטוזואה יש רק סוג אחד של רבייה, היינו, חלוקת-תא'.²⁴ מבחינה פיסיולוגית, פרוטוזואון הוא אורגניזם אינדיבידואלי באותו אופן שמקוזואון הוא אורגניזם אינדיבידואלי; אולם לפי המורפולוגיה ושיטת ההיווצרות שלו, אפשר להשוותו לתא נבט ממש כמו לכל תא אחר של מטוזואון. פרוטוזואה הם איפוא חומר פשוט, המתאים באופן מיוחד לחקר חלוקת-התא, המתגלה בהם בצורתה הטהורה והגלויה ביותר. שנית, בתוך המיגוון העצום, שהוא כמעט אינסופי, של אורגניזמים רב-תאיים, נמצאו כמה מתאימים במיוחד לתצפיות בגרעין התא, בתאי הנבט ובהתפתחות העובר. משני סוגים אלה של אורגניזמים מועדפים צריך היה לבחור חומר על-פי המטרה הספציפית של המחקר. אם רוצים לחקור חלוקת-תאים או את המורפולוגיה של הגרעין או את דרך היווצרותו, אזי האורגניזם שצריך לבחור בו הוא אֶסְקְרִיס, תולעת טפילה של סוס, שאת איכויותיה גילו ון-בנדן ופּוֹבְרִי. בוברי אמר,

אסקריס היא חומר שאין טוב ממנו. את הביציות אפשר לאחסן כמה חודשים, יבשות, בקור, מבלי שיחול בהן שינוי. כשיש זמן לעבוד, אפשר לעשות זאת בטמפרטורה של החדר, שבה הן מוסיפות להתפתח לאט. אם רוצים לזרז את התפתחותן באופן זמני, מכניסים את הביציות לאינקובטור. אם מוכרחים להפסיק את העבודה, מחזירים את הביציות לקירור, וכשחוזרים, מתברר שלא חל כל שינוי במצבן.²⁵

ומעל לכול, גרעין האסקריס הוא פשוט במיוחד; מספר הכרומוזומים קטן, בדרך-כלל ארבעה, ובטיפוס מסוים אפילו שניים; קל לזהותם, לצפות בצורתם ובהתנהגותם, להסתכל בהם מתחלקים לשניים ומסתדרים לאורכו של מעין כישור, המושך

אותם לשני קטבים מנוגדים בשעת התחלקות התא; בקיצור, אסקריס הוא אורגניזם אידיאלי לחקירת המנגנון שבאמצעותו תא אחד יוצר שני תאים דומים. אולם אם מבקשים לחקור תאי נבט, הפריה והתפתחות עובר ולא חלוקת-תאים, אזי האורגניזם שעדיף להשתמש בו הוא צפרדע, או אפילו קיפודים, שאת יתרונותיהם גילו הרטוויג ובוברי: הביצית שקופה וקלה לתצפית; הספרמטוזואון קטן, בעל גרעין צפוף ונראה בקלות. אם מניחים ביצית זרע של קיפודים בצלוחית של מיים, אפשר לראות את הספרמטוזואה ספוחים לביצית. 'אולם רק תא זרע אחד מגיע למטרה זו, הזרע הנוגע ראשון בשטח-הפנים החלק של הביצית,' אמר בוברי.²⁶ אפשר לעקוב אחרי נתיבו של גרעין הזכר המתאחה עם גרעין הנקבה, ולעקוב אחר רצף החלוקות, המתרחשות בביצית בסדר מדויק במרחב ובזמן – במלים אחרות, לצפות במפורט במין נס, שבעת התרחשותו נפרדים מיקטעים משני פרטים יחידים שונים, זכר ונקבה, חודרים זה לזה ומולידים אורגניזם חדש וזהה.

עם ביצית קיפודים, חקר התא והתפתחות העובר תדל להיות אך ורק תצפיתי, אלא נכנס למעגל הניסויים. הוכח שאפשר, למעשה, להשפיע על תאי הנבט או על הביצית המתפתחת, ואפילו לשנות את התנאים הכימיים והפיסיקליים של הפריה מלאכותית. על-ידי טלטול חזק של ביציות בלתי-מופרות הצליחו האחים הרטוויג לשבור אותן לחתיכות, שעדיין אפשר היה להפרותן בתאי זרע של אותו מין. בוברי טיפל בביציות בתרכובת מסוימות, והצליח להפרות כל אחת מהן בעזרת כמה ספרמטוזואה; וכשטילטל את הביציות האלו, הוא צפה בפיוור בלתי-נורמלי של כרומוזומים בתאים המתחלקים. על-ידי הגדלת ריכוז המלח במייהים, או על-ידי חשיפת הביציות לטיפולים כימיים או פיסיקליים שונים, לב גרם להשראה של רביית-בתולים מלאכותית. על-ידי בידוד תא אחד מביצית מופרית, שהתחילה להתפלג, השיג דריש התפתחות של אורגניזם שלם – קטן, אולי, אך מושלם. במאה ה-20 הלכה וגדלה הווירטואוזיות הטכנית של האמברולוגים. הם הצליחו לנתח תאים מסוימים בביצית, להרוס אותם כרצונם, להזריק לתוכם חומרים מסוימים או אפילו תמציות של עוברים אחרים, להוציא את גרעין הביצית ולהחליפו באחר. התוצאה נמדדה על-פי הגריעות

שהתפתחו בעובר, על-פי דרגת ההתפתחות שהגיע אליה, ועל-פי המפלצות שהופיעו. וכך נפתחה גם היווצרות העובר לאנליזה ניסויית.

משימתה הראשונה של הציטולוגיה במאה ה-19 היתה לבדוק מהו התפקיד שמשחקים בתיפקודי התא שני רכיביו העיקריים: גרעין וציטופלסמה. לאט לאט התברר שהגרעין ממלא תפקיד ראשון-במעלה; ובתוך הגרעין – הכרומוזומים. הקביעות במספריהם ובצורותיהם, הדיוק של תנועותיהם, והדקדקנות של הסגרגציה שלהם בתוצרי חלוקת-התאים, בגלל כל אלה יחד יש להם מקום מיוחד במינו. אפשר לראות את הכרומוזומים מתעבים, אחר-כך חוזרים וגעשים דקים, נעלמים ולאחר מכן מופיעים שוב בצורתם הקודמת. אפשר לראותם מתפצלים לאורכם לשני תוצרים זהים, שכל אחד נמשך לאחד הקטבים כאילו על-ידי 'מרכז מגנטי', כדברי ון-בנדן. הכרומוזומים מגלים רציפות במחזור התא. הם ניתנים באינדיבידואליות ובמבנה אופייני בשלבים מסוימים. בוברי אמר, שהם 'יסודות מאורגנים המתקיימים באופן אוטונומי בתא'.²⁷ מעל לכול, יש להם יכולת יוצאת מגדר הרגיל ליצור – על-ידי התחלקותם והתקבצותם-מחדש בכל קוטב – שני גרעינים, הוהים לגרעין המקורי. אפשר להבחין בין כרומוזום אחד למשנהו, לעקוב אחר התפתחותם, לספור אותם. הם מופיעים בזוגות: שתי קבוצות של שניים באסקריס, חוץ מאשר בתאי הנבט, בביצית ובספרמטוזואון, שבהם יש בכל גרעין רק שני כרומוזומים. אולם איחוי של שני גרעינים אלה בזמן ההפריה יוצר מערך מושלם של כרומוזומים, חצים מהאב וחצים מהאם. כל אי-דיוק במספר הכרומוזומים המקובצים-מחדש בדרך זו, כל עודף או כל חסר מחוללים אי-סדר בהתפתחות העובר. לדעת בוברי, 'התפתחות נורמלית תלויה בצירוף מסוים של כרומוזומים; ומשמעות הדבר יכולה להיות רק אחת: כל כרומוזום יחיד צריך להיות נידון באיכויות שונות'.²⁸ מדובר איפוא במבנה בעל מאפיינים מיוחדים במינם שנתגלו בתוך הגרעין, מבנה הניחן בתכונה נדירה שהיא יחודית בתא: שכפול מדויק.

בו-בזמן התפשטה הדואליות שנצפתה תחילה בתא אל האורגניזם

כולו. עד אז לא נעשתה כל הבחנה בין היסודות התאיים הקשורים במבנה ובין אלה הקשורים ברבייה. הילד ייצג הינץ של הוריו, אשר מהם שלח כל חלק, באמצעות תאי הרבייה, מעין נבט, שנועד ליצור־מחדש במדויק את אותו חלק בדור הבא. כלומר, כל חלקיק יחיד צריך היה להתקיים קודם־כול באיבר שבהורה, אחר־כך בתא הרבייה, ולבסוף באותו איבר בצאצא. לפי האקסלי, 'אפשר להעלות על הדעת, ואכן סביר, שכל חלק של הבוגר מכיל מולקולות שנוגזרו מההורה־הזכר ומההורה־הנקבה; ואם מתייחסים אליו כאל מסה של מולקולות, אפשר להשוות את האורגניזם כולו לאריג, שמקור השתי שלו הוא הנקבה, ומקור הערב שלו הוא הזכר.²⁹ אך עם מה שנגלי כינה בשם 'טרופופלסמה' ו'אידיופלסמה', הופיעה דואליות באורגניזם בשלמותו: הטרופופלסמה, היוצרת את חלקו העיקרי של הגוף, היא האחראית לתזונה ולגדילה; ולעומת זאת, האידיופלסמה מייצגת רק רכיב קטן מבחינת נפחו, אולם ממלאת תפקיד חיוני ברבייה ובהתפתחות; זהו חומר התורשה. בהיותה מוכלת בתוך הביצית, היא מכוונת את האבולוציה ואת ההתפתחות; היא מתפזרת בכל האורגניזם, ויוצרת מעין רשת־אב. אם ביצת התרנגולת שונה מביצת הצפרדע, הרי זה משום שהיא מכילה אידיופלסמה שונה. המין מוכל בביצית, ממש כמו שהוא מוכל באורגניזם הבוגר. אידיופלסמה היא חומר מורכב מאוד, המכיל מספר עצום של חלקיקים או 'מיצלות'. לפי חישוביו של נגלי, אלפית מילימטר מעוקב יכולה להכיל עד 400 מיליון מיצלות. אופן הפיזור של המיצלות באידיופלסמה הוא המבטיח את הספציפיות שלה. ההתרבות של צורות בדורות רצופים אינה מושגת איפוא עוד על־ידי נציגים מכל חלקי הגוף שהתאחדו־מחדש בביצית, אלא על־ידי חומר מיוחד המכוון את ההתפתחות. מבין כל הביולוגים בני־זמנו, נגלי יכול היה להיטיב לפרש את עבודתו של מנדל, שכן מנדל דיווח במיוחד לו, במכתב אחר מכתב, על תוצאות ניסוייו; אך, כידוע, מבלי להשיג ולו השפעה קטנה ביותר.

עם וייסמן התחדדה ההבחנה בין שני טיפوسی מרכיבים אלה. יתרה מזו, היא קיבלה צורה שונה: היא לא עסקה עוד בחומרים המצויים בכל הגוף, אלא בתאים עצמם. ברבייה היו מעורבים תאים מטיפוס מיוחד, תאי הנבט, שהיו שונים מהתאים המרכיבים את הגוף, תאי

הסומה; הם היו שונים בתיפקודם, במבנה שלהם ואפילו בתפקידם באבולוציה. לדעת וייסמן, תאי נבט מכילים חומר, אשר 'בזכות תכונותיו הפיסיקליות והכימיות וטבעו המולקולרי יכול להיעשות פרט-יחיד חדש מאותו מין'.³⁰ איכותו של חומר זה היא הקובעת אם האורגניזם שלא נולד עדיין יהיה לטאה או אדם, אם יהיה גדול או קטן, אם יהיה דומה לאביו או לאמו. רביה מבוססת רק על טבעם ותכונותיהם של תאי הנבט. 'אין הם חשובים לחייו של הפרט-היחיד, ובכל זאת הם בלבד משמרים את המין'.³¹

הרעיון שהילד הוא אך ורק מין הינץ של הוריו הועמד על ראשו כביכול. לדעת וייסמן, אף-על-פי שתאי נבט יכולים ליצור את שני טיפוסים התאים, תאי סומה יכולים ליצור רק תאי סומה. תאי הנבט אינם יכולים איפוא להיחשב לתוצר של האורגניזם. בדורות רצופים של בעלי-החיים, תאי נבט מתנהגים כקו של יצורים חד-תאיים המתרבים בדרך של התחלקות. מתוך קו-נבט זה מתמיינים תאי הסומה. גופם של בעלי-החיים מושגת כביכול אנכית על הקו הזה. וכך, כפי שאמר וייסמן,

הרביה של היצורים הרב-תאיים מתנהלת באותו נתיב כמו של בעלי-החיים החד-תאיים: התחלקות רציפה של תאים - ההבדל היחיד הוא, שבאורגניזמים מורכבים, תא הנבט איננו יוצר את הפרט-היחיד השלם, המוקף... במיליוני תאי סומה, היוצרים את האחדות החיצונית של הפרט-היחיד.³²

מאחר שתאי נבט מתרבים על-ידי התחלקות כמו פרוטוזואה, הם מכילים תמיד את אותו חומר תורשתי. האורגניזמים שאותם הם יוצרים צריכים בהכרח להיות זהים. קו-הנבט יוצר את השלד של המין, שאליו מחוברים הפרטים-היחידים כמו יבלות. מעתה, כבר לא התרנגולת היא היוצרת את הביצה. וכפי שביטא זאת באטלר באימרתו השנונה, הביצה מצאה בתרנגולת דרך נוחה ליצור ביצה נוספת.

אפשר להסיק מסקנה נוספת מהתפקידים שהוקצו לתאי הנבט ולתאי הסומה. אם תאי הנבט נגזרים ישירות מאלה של הדור

הקודם, אם הם לא נוצרו על-ידי גופו של ההורה, הרי בכל זאת באותו זמן הם היו מוגנים מאירועים חיצוניים. יהיו הפגעים שעלול האורגניזם לסבול אשר יהיו, תאי הנבט שלו, ולפיכך גם צאצאיו, מוגנים מפגעים אלה. כיצד איפוא יוכלו תכונות אופייניות שרכש יצור חי לעבור בתורשה? לדעת וייסמן, 'כל השינויים שנגרמו על-ידי השפעות חיצוניות הם זמניים ונעלמים עם הפרט-היחיד.³³ הם אפיוזדות חולפות, המשפיעות על אורגניזמים מסוימים, אך לא על המין. לפרטים-היחידים היוצרים את המין אין שום השפעה על מסגרתו. בעודם מוגנים מכל פגע, תאי הנבט מוסיפים ליצור תאים זהים. והאורגניזם איננו יכול איפוא לרכוש שום תכונה אופיינית שלא נקבעה על-ידי התורשה. כל עתידו של הפרט-היחיד, צורותיו ותכונותיו, נקבעו כבר בביצית. אף-על-פי שעדיין נשאר שוליים לפעולתם של תנאים חיצוניים, היא 'מוגבלת לאיזור גיד קטן סביב לנקודה קבועה, הנקבעת על-ידי התורשה'.³⁴ טבעם של תאי הנבט אמנם קבוע בתוך המין, אך יש שוני ביניהם במינים שונים. מה שמשתנה בעת הופעת צורות חדשות אינם הפרטים-היחידים עצמם, אלא 'המערכים התורשתיים' המוכלים בתאי הנבט. 'דומה שברירה טבעית פועלת רק על איכויותיו של האורגניזם הבוגר', אמר וייסמן, 'אולם, לאמיתו של דבר, היא פועלת על מערכים מוקדמים, המצויים חבויים בתא הנבט.'

בדרך ההסתכלות על התורשה התחולל איפוא מהפך קיצוני. עד אז לא הוטל ברצינות ספק באפשרות של העברת תכונות אופייניות נרכשות בתורשה. בכתבים העתיקים, יהיו אלה מצריים, עבריים או יוונים, יש שפע של סיפורים על תאונות שקרו להורים ואשר שבו וקרו לילדיהם. לאמאק ביסס על עניין זה מערכת שלמה, והציגה כמנגנון המסביר טרנספורמציות מקומיות - היד העוזרת, המאפשרת לאורגניזם להסתגל באופן מלא לסביבתו המיידית. להורשה של תכונות אופייניות נרכשות נלוו שפע של דעות קדומות: בריאה ספונטנית, פוריות של הצלבות בין מינים; בקיצור, כל המיתוסים העתיקים בדבר בריאת האדם, החיה והאדמה. יותר מכל דבר אחר, העברת תכונות אופייניות נרכשות הצליחה לעמוד בפני עריכת ניסויים. יותר מכל דבר אחר, היא עיכבה את הקירת החי בכלל, ואת חקר הרבייה בפרט. אפילו אצל דארווין, שביסס את

האבולוציה על תנודות ספונטניות, המופיעות בכל אוכלוסיה גדולה, פנגנזה עדיין מרשה לתנאים תיצוניים להשפיע ישירות על תכונות אופייניות נורשות. ואילו אצל וייסמן, סביבה כבר איננה יכולה לכוון את התורשה. אצלו, קוֹהֶנבט נמצא מעבר לתחום השפעתה של כל וריאציה שהיא, העלולה להופיע בפרטים־היחידים של המין. אף אחת מן ההעברות המשוערות של תכונות אופייניות נרכשות איננה עומדת בבדיקה. אף אחד מן האורגניזמים, שדור אחר דור מטילים בהם מום, איננו יוצר צאצאים בעל־מום. גם אם חותכים זנבות עכברים באופן שיטתי בשעת הלידה במשך חמישה דורות, מאות עכברים קטנים מוסיפים להיוולד עם זנבות נורמליים, שאורכם הממוצע הוא כמו זה של קודמיהם. התורשה משמשת הגנה כנגד כל מיני גחמות, השפעות, תשוקות או מקרים הקורים אצל הפרט־היחיד. היא שוכנת בתוך החומר ובסידור החומר. לדעת וייסמן, 'מהותה של התורשה היא העברתו של חומר גרעין בעל מבנה מולקולרי ספציפי'.³⁵ רק שינויים בחומר זה, או 'תנודות', יכולים לגרום לשינויים בני־קיימא ביצורים חיים. כל מנגנון התורשה, ההשתנות והאבולוציה איננו תלוי בהנצחה של תכונות אופייניות נרכשות במשך הדורות, אלא בסגולותיו של מבנה מולקולרי.

וכך הופיעו בשלהי המאה ה-19 שני יסודות חדשים. הציטולוגיה גילתה שיש בגרעין התא מבנה בעל תכונות משותפות; ובניתוח ביקורתי של יציבות המינים ושל ההשתנות שלהם התגלה שתורשה נגרמת על־ידי העברתו של חומר מיוחד. כל החוקרים הסכימו, שחומר זה מצוי בכרומוזומים. כל דבר בהם הצביע שהם מתאימים למשימה זו: הקביעות במספרם וצורתם; הדיוק של התפצלותם ופיזורם בעת חלוקת־התא; הפחתת מספרם בחצי בתאי הנבט; ולבסוף, איחויים בביצית בזמן ההפריה, שכתוצאה ממנו הצאצא מקבל מספר שווה של כרומוזומים מהאב ומהאם. רק חומר־הגרעין יכול לשאת את 'הנטיה התורשתית'. ונטיה זו כללה לא רק את המערכים של ההורים, אלא גם את אלה של אבות־אבותיהם הרחוקים יותר. כל אחד מתאי הנבט, המתאחד בעת ההפריה, מכיל כרומוזומים מהסבא, מאבי־הסבא, וכן הלאה. לדעת וייסמן, החומר הבא מהדורות הקודמים מצוי 'בפרופורציה למרחק שלהם בזמן,

ביחס הולך ויורד, לפי אותו חישוב שהשתמשו בו עד אז מטפחי העדרים בעת הכלאות הגזעים, כדי לקבוע את שיעורו של "הדם הכחול" המצוי בצאצא'.³⁶ הכרומוזומים של האב מהווים מחצית הגרעין של הילד; אלה של הסבא רבע, אלה של הדור העשירי לאחור 1/1024, וכן הלאה. סוגיות התורשה מצויות איפוא בתחום המתמטיקה הפשוטה. בכל דור, הכרומוזומים שהגיעו מהאב ומהאם מסתדרים מחדש. ניתוח סטטיסטי מאפשר לאמוד את תרומותיהם של אבות קדמונים שונים לחומר התורשתי של פרטייחיד. 'בתופעות ביולוגיות', אמר דה־פְּרִיס, 'סטיות מן הממוצע מתרחשות לפי אותם חוקים כמו סטיות מהממוצע בכל שאר התופעות שאינן נשלטות אלא על־ידי המקריות'.³⁷ כל הגופים, חיים או דוממים, מצייתים לחוק הסטטיסטי.

רק אז יכול היה מדע התורשה להתפתח. לעתים קרובות נאמר שחוקי מנדל 'התגלו־מחדש' בתחילת המאה. אולם מה שהתגלה־מחדש היה מעל לכול גישתו של מנדל, גישת המכניקה הסטטיסטית: אותה תשומת־לב הממוקדת במספר קטן של תכונות אופייניות, והתעלמות מפרטים; אותה בחירה בתכונות אופייניות שיש ביניהן די הבדלים בולטים כדי שאפשר יהיה להכניס אירציפות; אותה שיטה של מיספור הצאצאים של הצלבה, ספירת הטיפוסים והצבתם במחלקות מוגדרות; אותו עניין באוכלוסיות ולא דווקא בפרטים־יחידים, אם כי נרשם אילן־היוחסין שלהם; אותו ניתוח של התוצאות על־ידי עיבוד סטטיסטי; אותו ייצוג על־ידי סימול הגורמים; אותה הבחנה בין מה שנראה ובין מה שחבוי. מכאן, כמובן, אותן תופעות, אותן מסקנות, אותם חוקים. גישה זו לניתוח התורשה נעשתה מקובלת כל־כך, עד שעבודתו של מנדל, שהתעלמו ממנה למעלה משלושים שנה, 'התגלתה־מחדש' בעת ובעונה אחת בגרמניה, באוסטריה ובהולנד, ואחר־כך באנגליה, בארצות־הברית ובצרפת. ההתפשטות המהירה של הגנטיקה מראשית המאה ה-20 והלאה שיקפה את חשיבותה הכלכלית ממש כמו את משמעותה הביולוגית. כמה מבין אלה שהיו מעוניינים בתורשה חקרו את האבולוציה; אך היו ביניהם גם אנשים שניסו להגדיל את התפוקה של הגידולים החקלאיים ושל בעלי־חיים. הניתוח של מנגנון ההשתנות והניסיון לשפר את זוגי

הצמחים ובעלי־החיים היו כרוכים באותן שיטות, באותן בעיות. מטפחי העדרים והאגרונומים, שלרשותם עמדו אמצעים רבים, שיתפו פעולה עם הביולוגים. הם נפגשו יחד באגודות מסוימות, כמו 'האגודה האמריקאית לטיפוח בעלי־חיים', שנשיאה הגדיר את מטרותיה כדלהלן: האגודה 'מציעה שמדענים בתחומי ביולוגיה שונים יניחו לזמן־מה את בעיותיה המעניינות של האבולוציה ההיסטורית ויתפנו לעסוק בצרכיה של האבולוציה המלאכותית. ולעומת זאת, האגודה מבקשת ממטפחים מעשיים, שבעודם מעוניינים להרוויח כסף מטיפוח בעלי־חיים, יתפנו מדי פעם ממלאכתם וילמדו את חוקי ההכלאה. האגודה קוראת למטפחים ולחוקרי התורשה לעבוד יחד לתועלתם ההדדית.³⁸ כבר מן ההתחלה נעשה לעתים קרובות שימוש במידע שהתקבל בחקר הגנטיקה ויישמו אותו באורגניזמים שיש להם חשיבות לאדם, כמו חיטה, תירס, כותנה וחיות משק.

האיכויות של החומר מילאו תפקיד ראשון־במעלה בגנטיקה. לדעת דה־פריס,

כדי ללמוד את חוקי התורשה הכלליים צריך לדחות לגמרי את המקרים המורכבים, ולהחשיב את טוהר התורשה של הורים כאחד התנאים הראשונים להצלחה. יתרה מזו, מספרם של הצאצאים חייב להיות גדול מאוד, שכן בקבוצה המכילה צמחים מעטים, אי־אפשר לקבוע את הקביעות וגם לא את הפרופורציות המדויקות במקרים של אי־יציבות. ולבסוף, כדי להחליט סופית מהו חומר המחקר, חייבים לזכור שהיעד העיקרי הוא להבהיר את היחסים הקושרים צאצאים להוריהם.³⁹

בוטנאים כמו דה־פריס, קוֹרְן וצ'רְמַק היו הראשונים לגלות־מחדש את גישתו המחקרית של מנדל. למעשה, צמחים מתאימים במיוחד לחקר התורשה: בחקלאות נוצרות אוכלוסיות עצומות; ותהליכי ההפריה ניתנים לבקרה. במשך הזמן עסקו המחקרים בחיות מעבדה קטנות, כמו שזרקים, ארנבות וחולדות. אולם טיפוס עבודה זה היה זקוק למושא ניסויי בעל תכונות מיוחדות במינו. נדרש אורגניזם פשוט דיו, כדי לגדלו בקלות במעבדה; קטן דיו, כדי לטפל באוכלוסיות גדולות שלו בשטח מוגבל; ומתרבה מהר, כדי לעבוד

עם דורות רצופים בפרק־זמן קצר. תכונותיו האופייניות צריכות היו להיות מובחנות בקלות בתצפית, ההזדווגות תדירה והפוריות גבוהה. תאיו של האורגניזם צריכים היו להיות מתאימים לבדיקה תחת המיקרוסקופ, ומספר הכרומוזומים קטן דיו, כדי להבחין בחריגות שלהם. החומר הנדיר היה בגמצא: זבוב הפירות (*Drosophila*). למעלה ממחצית המאה בדקו גנטיקאים ברצינות את עיניו, כנפיו ושערותיו של זבוב זה, שמורגן היה הראשון לעבוד עליו.

הטכניקות והשיטות שאומצו על־ידי הגנטיקה איפשרו לחקור הן את מנגנון ההשתנות ביצורים חיים ואת אופייני המבנה הנמצא ביסוד התורשה. קודם־כול, על־ידי בדיקה של מאות או אפילו אלפי צמחים ובעלי־חיים, ולא רק פרטים־יחידים בודדים, אפשר היה לצפות בשינויים המתחוללים בתכונות האופייניות באוכלוסיה הנחקרת. במשך המחצית השניה של המאה ה-19 טענו החוקרים, שוריאציות נגרמות על־ידי הצטברות הולכת וגדלה של שינויים זעירים, אשר כל אחד בפני עצמו נעלם מן העין. אם התורשה מועברת על־ידי תמציות מכל תא, כפי שחשב דארון, או על־ידי חומר שבגרעין, כפי שחשב וייסמן – התגודות שכל תכונה אופיינית נתונה להן הן הבסיס של ההשתנות ושל האבולוציה. עוצמתה של תכונה אופיינית לעולם אינה זהה במדויק מפרטי־יחיד אל משגהו באותו מין. היא יכולה להתחזק או להיחלש. באוכלוסיה תמיד מתקיימת תגודה כלשהי; אך ה'תגודות' של תכונה אופיינית. לעולם אינן סוטות בהרבה מהממוצע. אולם, בסופו של דבר, הבדלים אלה הצטברו וגרמו וריאציות חשובות, כאשר פעולת המיון – זו שנעשתה במתכוון על־ידי המטפח, או באופן ספונטני על־ידי תנאי הסביבה – מפנה תמיד את לחץ הברירה לאותו כיוון. בתחילת המאה ה-20 השתנה לגמרי המנגנון של השתנות התכונות האופייניות. לדעת דה־פריס, ההשתנות כבר איננה מתרחשת בסדרה של שינויים שקשה להבחין בהם, אלא בשינויים פתאומיים ברורים היטב.

המינים אינם משתנים בהדרגה, אלא נשארים ללא שינוי בדורות רצופים. פתאום הם יוצרים צורות חדשות, השונות באופן מובחן מהוריהן, ולפיכך

הן מושלמות, קבועות, מוגדרות־היטב וטהורות כפי שאפשר לצפות מכל מין נתון שהוא.⁴⁰

אם כן, הטבע מדלג. והאמצעי שהוא נוקט כדי ליצור זנים ומינים חדשים הוא המוטציה.

מוטציות, שלא כמו תנודות ושינויים הדרגתיים שקשה להבחין בהם, נגישות לתצפית ולעריכת ניסויים. אם משתמשים בחומר מתאים, ואם הגזע טהור והאוכלוסיה גדולה דיה, אפשר למדוד את תדירות הופעתן, לקבוע בדיוק מהם אופייניהן, ולנסח את החוקים השולטים בהן. את החוקים האלה אפשר לסכם במלים ספורות: נדירות, פתאומיות, אי־רציפות, חזרה, יציבות, מקריות, כלליות. בראש ובראשונה, מוטציה היא דבר נדיר: במשך דורות רצופים, רוב רובם של הפרטים היחידים אינם מושפעים. 'הסיכויים לגלות מספר גדול של מוטנטים הם קטנים', אמר דה־פריס. 'צריך לצפות שהם יהיו רק שיעור זעיר בתרבות'.⁴¹ הצורות המוטנטיות מופיעות 'לפתע', 'מבלי שיצפו להן'. מלכתחילה הן ניחנות 'בכל התכונות האופייניות של הטיפוס החדש ללא צורות ביניים'; 'אין שום מעבר בין פרטים יחידים נורמליים ובין צורות מוטנטיות'. לצורות החדשות יש צאצאים יציבים; הן מתמידות במשך דורות, והן נורשות משמגיע תורן; אין הן מראות 'שום נטיה לחזור בהדרגה לצורתן המקורית'. הצורות המוטנטיות אינן מיוצרות פעם אחת בלבד, אלא באופן סדיר, ו'הטיפוסים מופיעים שוב ושוב בדורות רצופים'. מוטציה משפיעה רק על תכונה אופיינית אחת בכל פעם. אף־על־פי־כן, יהיו החומר והתכונה האופיינית הנחקרים אשר יהיו, 'מוטציות הן הכלל'. ולבסוף, במוטציות אין שום כיוון מועדף, אין שום קשר בין היווצרותן ובין ההשפעה של תנאים חיצוניים, אין שום מיתאם בין הופעתן ובין התועלתיות שלהן. הן מופיעות במקרה ומייצגות 'נסיגה' באותה שכיחות שהן מייצגות 'התקדמות'. הן מתפתחות 'בכל הכיוונים', אמר דה־פריס. 'שינויים מסוימים מועילים, אחרים מזיקים, אך לרבים מהם אין שום חשיבות וגם אין הם מועדפים או בלתי־מועדפים'.⁴² מכאן, שכל התכונות האופייניות מתגוננות לכל עבר, ולפיכך מספקות 'כמות עצומה של חומר, שימוין עלידי מסוננת הברירה הטבעית'.

המעמד החדש של ההשתנות הצדיק אפוסטריורי את הגישה האמפירית שאומצה לראשונה על-ידי מנדל ומאוחר יותר על-ידי הגנטיקאים בניתוח התורשה. האי-רציפות, שהוכנסה באופן שרירותי רק למטרות ניסוי, משקפת למעשה את מהלך הטבע. אם מאפיין יחיד יכול להופיע בכמה צורות המובחנות מאוד זו מזו, אם אפשר לייצג צורות אלו על-ידי סדרה של סמלים, הרי זה משום שהגורם הקובע של התכונה האופיינית יכול להתקיים בכמה מצבים בדידים. שינוי של הגורם איננו מתרחש באמצעות סדרה של מצבי-ביניים, אלא כשינוי פתאומי ממצב אחד למצב אחר. כמו שינויים בחומר ובאנגריה, וריאציות בתורשה מתרחשות בקפיצות קוואנטיות. אפשר לעודד את הקפיצות האלו ולהגדיל את תדירות המוטציות על-ידי חשיפת תאי הזרע של דרוזופילה לקרני-X, כפי שעשה מילר; או על-ידי חשיפת האורגניזמים לתרכובות כימיות מסוימות. ובכל זאת, אם מוטציות מתרחשות באופן 'ספונטני' או 'מיוצרות באופן מלאכותי', הן תמיד אקראיות. לעולם אין קשר בין התרחשותן ובין תנאים חיצוניים, שום בקרה איננה מופעלת עליהן על-ידי הסביבה. על-ידי שלילה מוחלטת של אפשרות העברתן של תכונות אופייניות נרכשות, ניתוח המוטציות הגדיר את תפקידיהן של התורשה והסביבה בהיווצרות של יצורים חיים. סביבה יכולה להשפיע על האורגניזם רק בגבולות הצרים של תנודות המותרות על-ידי מה שכינה וייסמן 'מבנה מולקולרי של חומר התורשה', מה שהיה ידוע מאוחר יותר בשם 'חומר גנטי'. מחוץ לגבולות אלה, אין אורגניזם.

הנושא האחר שגנטיקה עסקה בו היה חקר הארגון והתנועה של מה שמנדל ציין במונח 'גורמים', והגנטיקאי הדני יוהנסן שינה אותו ל'גנים'. גורמים אלה נעשו נגישים לניסויים באמצעות הכלאה. אולם לא נערכו הצלבות בין זנים שונים ממוצא בלתי-ידוע, אלא בין מוטנטים של תכונות אופייניות שונות, שנגזרו מאותו קו. ואז נבחן המנגנון הממשי של ההשתנות. כמו מנדל, גם הגנטיקאים בתחילת המאה ה-20 חקרו רק תכונות אופייניות מעטות בכל פעם; תכונות אופייניות אלה התפלגו באופן בלתי-תלוי. אולם ככל שנחקרו עוד ועוד טיפוסים שונים של מוטציות, כן החלו להופיע אנומליות. דומה שקבוצות מסוימות של תכונות אופייניות

'צמודות': היתה להן נטיה להישאר יחד בדורות רצופים. לעומת זאת, דומה שאחרות 'דוחות' זו את זו. בתרבויות דרוזופילה של מורגן הופיעה סדרה שלמה של מוטציות, ששינו צבע עיניים או צורת כנפיים. בדורות רצופים, תכונות אופייניות אלה נשארו מחוברות לזוויג של החרקים כאילו בקשר בלתי־נראה. נדמה היה למורגן ולעמיתיו, ברידג'ס, סטורטבנט ומילר, שהגנים היו קשורים למבנה ליניארי כלשהו, או 'קבוצות תאחיזה'. בדרוזופילה הבחינו הגנטיקאים בארבע קבוצות תאחיזה והציטולוגים בארבעה כרומוזומים. אפשר היה להביא לחפיפה בין גנטיקה לציטולוגיה, על־ידי הקצאת כל קבוצת תאחיזה לכרומוזום מסוים. אפילו אפשר היה לקשור את מינו של בעל־החיים עם אחד מהמבנים האלה. בסופו של דבר, תנועתם של הכרומוזומים ופזורים, ושחלוף הגנים בין כרומוזומים הומולוגיים, הם שהיו אחראים להבדלים התורשתיים בין פרטים־יחידים של מין מסוים. על־ידי קביעת התדירות שבה התאחדו ונפרדו תכונות אופייניות בדורות רצופים התאפשר לערוך אותן בסדר ליניארי לאורך הכרומוזומים כמו פנינים במחרוזת. אפשר היה לאמוד את המרחקים היחסיים בין הגנים ולצייר מפה גנטית של המינים.

לרשות הגנטיקאי עומדות לפיכך שלוש דרכים לנתח את התורשה. הוא יכול לבחון את התיפקוד בעזרת התכונות האופייניות, את המוטציות בעזרת השינויים בהן, ואת הרקומבינציה בעזרת התקבצותן מחדש. כל אחת מהשיטות האלה מאפשרת לו לצמצם את החומר הגנטי ליחידות בדידות. אף־על־פי־כן, ללא קשר לשיטת הניתוח, התוצאה הסופית היא היינו־הך: הגן מייצג יחידה של תיפקוד, של מוטציה ושל רקומבינציה גם יחד. וכך חומר התורשה התפרק ליחידות־יסוד, שאי־אפשר לחלק עוד. הגנים הפכו להיות האטומים של התורשה. אף־על־פי שעל־ידי מוטציות יכול הגן להופיע בכמה מצבים בדידים, רק אחד מהם מצוי בכל כרומוזום. בגלל נוקשותו והפורמליזם שלו לא התקבלה רעיון קוואנטי זה של התורשה בקלות על־ידי הביולוגים, אשר יום־יום ראו מעין רציפות בהשתנות. אולם היא עלתה בקנה אחד עם מושגי הפיסיקה, שהרי בדרך זו הצטמצמו תכונות האורגניזם ליחידות בלתי־מתחלקות וצירופיהן צייתו לחוקי ההסתברות, שנשלטו

על־ידי המקריות. כשם שלא היה אפשר לנבא את תנועתו של אטום או של אלקטרון מבודד, כן לא היה אפשר לנבא את הופעת צירוף מסוים של גנים בפרט־יחיד כלשהו. כשהציעה הרקדנית איזאדורה דאנקן לברנרד שאו שיביאו לעולם ילד, אשר בו ישולבו יופיה של האם ותבונתו של האב, שאו סירב בטענה, שהילד עלול לרשת את מראהו ואת שכלה! רק באוכלוסיות גדולות אפשר למדוד פיזור ולחשב הסתברויות.

בין כל המרכיבים של היצורים החיים, לחומר הגנטי יש מעמד מועדף. הוא נמצא בשיאה של הפירמידה והוא המחליט מה יהיו תכונותיו של האורגניזם. על כל שאר המרכיבים מוטל לבצע את ההחלטה. ובכל זאת, ללא הציטופלסמה שמסביבו, אין הגרעין יכול לעשות מאומה. התא בשלמותו הוא יחידת־היסוד של החי, המנטר את התכונות, מטמיע, גדל ומתרבה. הגן מייצג את שיא הניתוח הגנטי, אך הוא משולל אוטונומיה. הביטוי שלו תלוי בדרך־כלל בגנים אחרים. החומר הגנטי בשלמותו, הצירוף המסוים של הגנים הממומש באורגניזם, הוא הקובע את ההתפתחות, הצורה והתכונות. ברירה טבעית פועלת על אוכלוסיות על־ידי העדפת ההתרבות של פרטים־יחידים מסוימים. אבל התוצאה היא, שברירה טבעית משפיעה בדרך עקיפה גם על החומר הגנטי עצמו, בכך שהיא פועלת בשלוש רמות. תחילה על התכונה האופיינית, כלומר, הגן עצמו: כל מצב מועדף אם הוא מייעל את ההתרבות בדרך כלשהי. לאחר מכן היא פועלת על הפרט־היחיד, הנחשב למיקבץ של גנים: לצירופים מסוימים יש סיכויים רבים יותר מהאחרים להעמיד צאצאים. לבסוף, היא פועלת על המין, הנחשב לסכום כל הגנים השייכים לכל הפרטים־היחידים במין: ההופעה של גנים חדשים על־ידי מוטציות, או של מיקבצים חדשים באמצעות רקומבינציה, גורמת להופעה של צורות חדשות, שמביניהן בוחרת הברירה הטבעית. במעין מחזוריות, מצע התורשה נעשה גם זה של האבולוציה.

הגנטיקה הקלאסית שייכת לתחום הביולוגיה החוקר את האורגניזם בשלמותו או אוכלוסיות של אורגניזמים. אין היא מנסה לבתר את בעל־החיים או לתתוך את הצמח כדי להכיר את רכיביו ולחקור את התיפקודיות שלו. בחקירתם, הגנטיקאים משתמשים

בשיטת 'הקופסה השחורה'. האורגניזם נחשב לקופסה סגורה, המכילה מספר רב של גלגלי־שיניים, המשולבים יחד במנגנון מסובך מאוד. שרשרות של ריאקציות מתרחשות, מצטלבות זו עם זו ומשתלבות זו עם זו לכל עבר. קצה אחד של כל שרשרת מונח על שטח־הפנים של הקופסה: זוהי התכונה האופיינית. הגנטיקה איננה מנסה לפתוח את הקופסה ולפרק את גלגלי־השיניים. היא רק בוחנת את שטח־הפנים, כדי להסיק על התכולה. בעזרת התכונה האופיינית הנראית היא מנסה למצוא את הקצוות הבלתי־נראים של שרשרות הריאקציות, לגלות את המבנה המונח חבוי בקופסה, מנטר את צורתה ותכונותיה. הגנטיקה מתעלמת לגמרי מגלגלי־השיניים, המתוכים בין הגן לתכונה האופיינית. בטווח הארוך, תמונה של פשטות רבה מתבהרת משיטת ניתוח זו. פשטות במכניקה שנכפתה על החומר הגנטי, כפי שהוא מסומל על־ידי תנועת הכרומוזומים, התחלקותם, התפרדותם והתקבצותם־מחדש. פשטות גם במבנה עצמו, שכן סידור הגנים היה מיוצג על־ידי הדבר הפשוט ביותר להבנה: הקו הישר. הגן עצמו, יסוד־התורשה, נראה כמבנה תלת־ממדי בעל מורכבות עצומה, שלא פתחה שום פתח לניסוי. ואולם כדי לתאר את מה שמצוי בתשתית הצורות, התכונות והתיפקודיות של האורגניזם החי כולו, קשה היה להעלות על הדעת מודל פשוט יותר מאשר חלק של מחרוזת פנינים. כל הווריאציות של התכונות האופייניות, כל המוטציות תאמו לשינויים בסידור הפנינים במחרוזת.

בתוך שנים אחדות שינתה תיאוריית הגן לגמרי את תמונת עולם־החי. בסופו של דבר, התכונות של בעלי־החיים ושל הצמחים וההשתנות שלהם היו מבוססים על תמידותו וביצועיו של מבנה המצוי בתוך התא. אולם גם לשיטת הקופסה השחורה היו מגבלות משלה. בתחילת המאה ה-20 היא איפשרה לתורשה ללבוש צורה, להיות מיוצגת על־ידי מערכת סימנים פשוטים ולהיעזר במתמטיקה. אולם ההתעלמות מגלגלי־השיניים השאירה פער בין הגן לתכונה האופיינית. על־ידי שימוש בסמלים ובנוסחאות, תמונת האורגניזם שציירה הגנטיקה הלכה ונעשתה מופשטת יותר ויותר. כתוצר של ההיגיון, הגן דמה לישות ללא גוף, ללא צפיפות, ללא חומר. ואז התעורר הצורך להעניק תוכן מוחשי למושג מופשט זה.

מנגנון התורשה דרש שהכרומוזומים יכילו חומר, הניתן בשתי סגולות נדירות: יכולת להתרבות בצורה מדויקת, ויכולת להשפיע על תכונות האורגניזם על-ידי פעילותו. לקראת אמצע המאה ה-20 שאפו הגנטיקאים לגלות את טבעו של החומר הזה, להסביר איך הגנים פועלים, ולמלא את הפער בין גן לתכונה אופיינית. אולם עמדתה של הגנטיקה, חומרי המחקר שלה ומושגיה לא התאימו לחקירה מטיפוס זה. עתה, כדי למצוא את המבנה המפורט המנטר את התורשה, לא היה די בצפייה בתכונות אופייניות ספורות ובמדידה של תדירות התאגדותן. נדרש שיתוף-פעולה בין הגנטיקה לכימיה.

אנזימים

הכימיה של היצורים החיים, בניגוד לגנטיקה, נמנית עם אותו ענף בביוֹלוגיה המנסה לפרק את האורגניזם לרכיביו. במחצית השניה של המאה ה-19 סימנה הכימיה האורגנית את גבולות תחומה. הצעד הבא היה להגדיר את עמדתה ביחס לכימיה האי־אורגנית, ולציין הן את טבען של התרכובות והן את מנגנון הריאקציות המיוחדות ליצורים החיים. עד אז היו חוקרי הכימיה האורגנית עסוקים בעיקר בניסיון לזהות את שפע התרכובות שהם מיצו ולערוך להם אנליזה. לכל החומרים האלה היה מאפיין אחד משותף: נוכחותו של פחמן. אולם אפשר היה לסווג אותם לפי טווח רחב של אמות-מידה: לפי גודלם – מולקולות גדולות או קטנות; לפי טבעם – פחמימות, שומנים או חומרים אלבומיניים; לפי תפקידם – פלסטי או מטבולי; לפי תיפקודם הכימי – כוהלים, אלדהידים, אַתְרִים וכדומה. רשימת החומרים, שכבר היתה ארוכה למדי, הלכה והתארכה ככל שהיתוספו חומרים חדשים, כמו חומצה עתירת-פוספט, אשר מיצה מיישר ממש בתקופה שהכליא מנדל את האפונים: מקומה בתוך גרעין התא העניק לה את השם 'חומצת גרעין', אם כי עדיין לא נמצא לה כל שימוש. אולם האנליזה הכימית התמקדה כמעט אך ורק במיצוי תרכובות מחומרים טבעיים, בהפרדתם זה מזה ובשינוים, כדי לגלות, בעדינות רבה ככל האפשר, את סידור היסודות במולקולה. אמנם כבר לפני־כן יכלו הכימאים לפרק

חומרים אורגניים, אך עדיין לא ידעו איך להרכיב אותם מחדש. למעשה, במשך זמן רב הם עצמם סירבו להודות בעצם האפשרות לערוך סינתזות מעין אלה. הטרנספורמציות המלוות את זרימת החומר דרך יצור חי שמו לאֵל את תוקי הכימיה האי־אורגנית. להעביר אטומים ורדיקלים בביטחון כה רב, להנחות כל יסוד למקומו במולקולה בדיוקנות כה רבה, ליצור תרכובות יחודיות בדיוק כה רב, לכל אלה נדרש משהו נוסף על חוקי הכימיה: נדרש כוח ויטלי. בעומדה בגבול שבין החי לדומם, הכימיה האורגנית הקימה מחסום, שאותו החשיבה כבלתי־עביר.

אחרי אמצע המאה ה-19 השתנתה עמדתה של הכימיה, והצורך להזדקק לכוח כלשהו שהוא מעבר לחוקי הפיסיקה הלך והתמעט. בזה אחר זה קרסו המכשולים שהוצבו בין הכימיה האורגנית לכימיה האי־אורגנית. ראשית, מושגי האנרגיה ושימור האנרגיה החלו נוטלים את אחד התפקידים שיוחסו בעבר לכוח ויטלי. אנרגיה מצויה בעצם המבנה של תרכובת כימית: כלומר, בכוחות הקושרים יחד את האטומים במולקולה. כשקשרים אלה ניתקים והאטומים הולכים ומסתדרים במבנה חדש בעל קשרים חלשים יותר, עודף האנרגיה משתחרר בצורה של חום, אור, חשמל או כוח מכני. אפשר לחשב את האנרגיה המוכללת בתרכובת ולמדוד את כמות החום המשתחררת בעת הריאקציה. למשל, כשפתם נשרף, ניתקים הקשרים המחברים פחמן לפחמן, וחמצן לחמצן; ואז, שני טיפוסי האטומים השונים יכולים להתאחד. אולם האנרגיה המוכללת בפחמן הדו־חמצני, הנוצר בדרך זו, חלשה מהאנרגיה של הקשרים המתברים את אטומי הפחמן בפחם. כשאורגניזם צורך גלוקוזה, רק חלק מהגלוקוזה הופך לתרכובות אורגניות יחודיות. השאר נשרף ומתחבר עם חמצן, ובתוך כך משחרר לא רק פחמן דו־חמצני ומים, אלא גם אנרגיה. אנרגיה יכולה ליהפך לחום או לחזור ולשמש בריאקציות כימיות אחרות. ביצורים החיים מתחוללות טרנספורמציות כימיות באמצעות זיווג ריאקציות, המאפשרות מעבר של אנרגיה. נוסף לזרימת חומר דרך האורגניזם, יש זרימה של אנרגיה. מעתה, מה שנדרש ליצירת פרוטופלסמה וגם לגדילה כבר איננו כוח ויטלי, אלא אנרגיה. ולפי הלמהולץ,

יכולים להיות 'גורמים' אחרים הפועלים בגוף החי ולא דווקא אלה הפועלים בעולם האי־אורגני, אך כוחות אלה, בה במידה שהם גורמים להשפעה כימית או מכנית בגוף, חייבים להיות בעלי אותו אופי כמו הכוחות האי־אורגניים...; לא יכולה להיות שום בחירה שרירותית בכיוון של פעולותיהם.⁴³

מהתרמודינמיקה התפתחה הכימיה הפיסיקלית, שחישבה את האנרגיה הזמינה בתרכובות, קבעה מהם קצבי הריאקציות ומדדה את שיווי־המשקל שלהן. הכללים של הכימיה האי־אורגנית הלכו והתפשטו בהדרגה גם לתרכובות אורגניות. התברר שבסדרה שלמה של תופעות ביולוגיות, כללי שיווי־המשקל הכימי ו'חוק המסות' תקפים גם הם. ביצורים החיים או במעבדה – חוקי הדינמיקה הכימית הם היינו הך, עבור כל הגופים.

הנושא השני שתרם לאיחודן של הכימיה האורגנית והאי־אורגנית היה הסינתזה המלאה של תרכובות אורגניות. במעבדה, יש כמה דרכים לייצר תרכובות. אפשר לקבל אותה על־ידי שיונים של חומרים אחרים: אם על־ידי חלוקת תרכובת מסובכת למיקטעים, או על־ידי סיפוח יסודות או רדיקלים לתרכובת פשוטה. לחלופין, אפשר לבנות את כל ארכיטקטורת המולקולה אך ורק מהיסודות המרכיבים אותה. לדעת הכימאי, רק השיטה האחרונה היא סינתזה מלאה. עצם האפשרות ליישם שיטה זו לרכיבים של היצורים החיים נראתה בעבר כדבר שאין לקחתו בחשבון כלל. בתרכובות אורגניות, היסודות מופיעים במספר כה מוגבל, אך במנות כה מדויקות ובצירופים כה מגוונים, עד שנראה היה כי הפקת חומרים אינה אפשרית בסינתזה במעבדה. בעבר נכשלו כל המאמצים לחקות את משחקי הטבע על־ידי אומנותו של הכימאי. וזהלר אמנם הצליח לסנתז שתנן וחומצה אוקסלית, וקולֶפֶה סינתז חומצה סליצילית וחומצת חומץ. אולם בסינתזות אלו היה מדובר בריאקציות מיוחדות, לא בשיטה כללית להפיק סדרה של תרכובות. יתרה מזו, בכל המקרים הללו צריך היה להתחיל מתרכובת שכבר היתה נגזרת של פחמן. מאחר שלא יכלו לקשור ביחד פחמן ומימן, הכימאים חשבו שהמחסום שבין האורגני למינרלי הוא בלתי־עביר. רק כוח ויטלי יכול היה להתגבר על הזרימה ההפוכה של כוחות הפועלים

על חומר. לדעת ליביג, חוקר הכימיה האורגנית גם לא היה חייב לאמת בסינתזה את התוצאות של אנליזה מבנית אורגנית.

אחרי אמצע המאה ה-19, נושא הסינתזות האורגניות הוצג במונחים שונים. לדעת ברתלו, נעשה 'הכרחי ליצור את התרכובות האורגניות מיסודות, במיוחד תרכובות בעלות תיפקודים מיוחדים, שאינם דומים לאלה של התרכובות הידועות לכימיה האי-אורגנית'.⁴⁴ אם כן, מעתה כבר לא היתה כאן שאלה של קבלת תרכובות ספורות על-ידי אמצעים מיוחדים במינם. היעד היה לשכלל עד שלמות שיטה, כדי לסנתז את כל הטיפוסים המגוונים ביותר של התרכובות האורגניות וליצור את הסדרה כולה. זה היה אפשרי מפני שהכימיה האורגנית היתה מבוססת על האופייניים של פחמן, והתכונות של נגזרותיו היו מבוססות על התיפקודים הכימיים שלו. 'את התרכובות האורגניות', כתב ברתלו, 'ניתן לסווג בהתאם לשמונה תיפקודים או טיפוסים עיקריים, המהווים את כל התרכובות הידועות כיום ואת כל אלה שנוכל ליצור, כך אנו מקווים, בעתיד'.⁴⁵ גם את שמונת התיפקודים הכימיים האלה אפשר לסדר בכמה קבוצות בהתאם למספר היסודות הקשורים עם הפחמן. אם כן, במחלקה הראשונה יש תרכובות בעלות שני יסודות בלבד, פחמן ומימן, הפחמימות; מחלקה אחרת של תרכובות בעלות שלושה יסודות: פחמן, מימן וחמצן, המאגדים ארבעה תיפקודים כימיים: כוהלים, אלדהידים, חומצות ואתרים; אחר-כך מחלקה של תרכובות חנקניות, שבהן מיוצגים שני תיפקודים: בסיסים ואמידים; ולבסוף, יש תיפקוד של 'רדיקלים מתכתיים' הכולל מתכות הקשורות לאתרים מסוימים. סדר המורכבות מכתוב את סדר הסינתזות. שכן, הקושי העיקרי נעוץ ממש בשלב הראשון; כלומר, לגרום לפחמן ליצור קשרים חדשים עם יסודות אחרים, במיוחד עם מימן. משעה שנוצרו הפחמימות, כל התיפקודים האחרים ניתנים לגזירה על-ידי סינתזה. אולם קשירת פחמן עם יסודות אחרים כבר איננה אך ורק פעולה אמפירית טהורה. יש לה מסד תיאורטי המבוסס על מושג הערכיות. לדעת קקולה, מה שמציין פחמן ונותן לו מעמד יחודי בעולם-החי הוא 'הארבע-ערכיות' שלו. כל אטום של פחמן יכול ליצור ארבעה קשרים עם אטומים אחרים, קשרים שהם 'רוויים' או 'בלתי-רוויים'

עליידי יסודות אחרים. שישה אטומים של פתמן יכולים להתחבר שניים שניים ליצירת שרשרת הנסגרת ב'טבעת' או 'גרעין ארומטי'. הארבע־ערכיות של הפחמן מאפשרת איפוא להגדיר את המיקום היחסי של אטומים בתרכובת, לאפיין את הקשרים הנוצרים ביניהם ולהסביר איזומרים על־פי פיזורם של האטומים במרחב – בקיצור, לייצג כל מולקולה אורגנית נתונה על־ידי מערכת של סמלים ולנבא את תכונותיה הכימיות. מכאן ניתן להסיק את החוקים הכלליים השולטים בהידרוגנציה של פחמן ואת המנות של היסודות הדרושות כדי לקבל תרכובת נתונה. בהשפעת קשת חשמלית או חום, הפחמן מתרכב ישירות עם מימן ליצירת הפחמימות הפשוטות ביותר, כגון אצטילן או אתילן. בסדרה של התמרות ניתן אז לסנתז את כל הפחמימות, צעד אחר צעד. 'אלה הן שיטות כלליות', אמר ברתלו, 'והן מאפשרות ליצור את כל הפחמימות מיסודותיהן: לפיכך הן מהוות את הקשר הסופי בין הכימיה האורגנית לכימיה האי־אורגנית, ושתייהן פועלות על־פי אותם עקרונות של המכניקה המולקולרית.'⁴⁶ פחמימות מייצגות את השלדים הפחמניים שעליהם אפשר להצמיד את כל התיפקודים הכימיים האחרים; אם באופן ישיר, על־ידי התמרה של פחמימה לכוהל, אלדהיד, חומצה וכן הלאה; או באופן בלתי־ישיר, תחילה יוצרים כוהל, שאותו משנים אחר־כך לאלדהיד או לחומצה, וכן הלאה. וכך, על־ידי שימוש ביסודות בלבד, בתוצא של 'זיקות כימיות', ובכוחות פיסיקליים כמו חשמל וחום – כלומר, בשיטות מעבדתיות בלבד – אפשר לייצר שפע של תרכובות אורגניות טבעיות. 'בגלל היווצרות זו [של התרכובות] ובגלל חיקוי המנגנונים הפועלים בצמחים ובבעלי־חיים', אמר ברתלו,

ניתן לקבוע כי, בניגוד לדעות עתיקות, הסגולות הכימיות של החיים נובעות מפעולתם של כוחות כימיים רגילים ממש באותה דרך שהסגולות הפיסיקליות והמכניות של החיים הן תוצאה של פעולת כוחות שהם פיסיקליים ומכניים בלבד. בשני המקרים, מדובר בפעולתם של אותם כוחות מולקולריים, שהרי הם יוצרים אותן סגולות.⁴⁷

אולם הכימאים לא הסתפקו בחיקוי מעשי הטבע וביצירת התרכובות שלו. הם גם יכלו לברוא תרכובות חדשניות, שדמו

לתוצרי הטבע והיו להן כמה תכונות משותפות. במידה מסוימת, עשייה זו נתנה תמיכה מוצקה לחוקי הכימיה המופשטים. מעתה כבר לא צריך היה אך ורק לדמיין אילו טרנספורמציות אירעו אי־פעם בכימיה של היצורים החיים. 'אנו יכולים לטעון...,' אמר ברתלו,

שאנו מבינים את הטיפוסים הכלליים של כל החומרים האפשריים ואף לגרום להם להופיע... כדי ליצור מחדש את כל התצורות שהתפתחו מבראשית, על־פי אותם תנאים ואותם חוקים וכוחות ששימשו את הטבע ביצירתם.⁴⁸

מעתה ואילך כבר לא היה איפוא שום גבול תיאורטי לכימיה האורגנית.

כל ההבחנות בין ריאקציות המתרחשות בעולם־החי ובין אלה המתרחשות במעבדה עמדו להיעלם סוף־סוף, לאחר שערכו עיקוף גדול מאוד שהוביל את הכימיה להתערב בתחום שהיה שמור קודם לכן לחוקרי־הטבע. למעשה, הכימיה היא שגילתה את תפקיד המיקרו־אורגניזמים בעולם זה. השימוש בשיטות כימיות הוא שעזר לסלק את שרידיה האחרונים של בריאה ספונטנית. עד אז, חומרים אורגניים אופיינו על־פי הרכבם ותכונותיהם הכימיות. בסוף המאה ה-19, המבנה המולקולרי, המיקום היחסי של אטומים, נעשה חשוב יותר, שכן התברר שתרכובות מסוימות, הידועות כאיזומרים, ניחנות בתכונות שונות, אף־על־פי שהרכבן הכימי זהה. הסוג הכימי, אמר פסטר, 'הוא אוסף של כל הפרטים־היחידים, שהם זהים בטבעם, במנתם ובסידורם של יסודותיהם. כל תכונות התרכובות הן פונקציה של שלושה גורמים אלה.'⁴⁹ אופיינים אופטיים מסוימים של התרכובות ניתן לייחס ל'אסימטריה המולקולרית' שלהם, דבר שסיפק כלי נוסף לאנליזה. אולם עד־מהרה התברר, שאי־אפשר ליצור, בריאקציות במעבדה, את האסימטריה שמוצאים בתוצרים טבעיים. 'לכל התוצרים המלאכותיים של המעבדות,' אמר פסטר, 'יש מראה חופף. ולעומת זאת, רוב התוצרים האורגניים הטבעיים... אלה הממלאים תפקיד חיוני בתופעות החיים של צמחים ובעלי־חיים, הם אסימטריים.'⁵⁰ לתרכובות המצויות באורגניזמים יש איפוא תכונה המבדילה אותן מהתרכובות

המיוצרות במעבדה. בכל אורגניזם יש כוח בלתי־ידוע, שאותו לא ניתן לשחזר במעבדה, הגורם לאסימטריה בפעילויות הכימיות. על־ידי חקר אסימטריה זו חדרה הכימיה אל עולם האורגניזמים המיקרוסקופיים, בתיווכן של תסיסות. בכל תסיסה מעורבים שני גורמים, אחד סביל, האחר פעיל. על הגורם הראשון, כמו סוכר, אפשר לומר שהוא 'ניתן לתסיסה'; הוא משתנה בהשפעת הגורם השני, או תסס, חומר חנקני בעל טבע 'אלבומינואידי'. בעיני ליביג, תסיסה היא התכונה של חומרים אורגניים מסוימים, אשר בהיותם בעצמם במצב של 'מטמורפוזה', יכולים להעביר תכונה זו לחומרים סמוכים. בעיני ברנוליוס, תכונה 'קטליטית' היא המעניקה לחומר את היכולת לשנות חומר אחר מבלי שהזרז בעצמו יהיה חלק מהטרנספורמציה. בכל מקרה ומקרה, כוח מיסתורי כלשהו הקצה לחומרים האלבומיניים את תפקיד התסס – כלומר, את היכולת לפעול, על־ידי מגע, על תרכובות הניתנות לתסיסה. בכל המקרים, הכוח להתסיס לא היה תכונה של האורגניזם בשלמותו, אלא של מרכיבים מסוימים שלו. ואילו בעיני פסטר, מדובר בעניין אחר לגמרי. אם יצורים חיים הם הגורמים אסימטריה מולקולרית בריאקציות הכימיות, אזי אסימטריה מולקולרית מעידה גם היא על נוכחותו של אורגניזם חי. בדרך זו חל היפוך בהליך הרגיל של המדע. בדרך־כלל הוא עשה את דרכו מידע תיאורטי לשאלות מעשיות שיש לאדם עניין בהן. כאן, הוא הלך בכיוון ההפוך. בגלל הקשיים שנתקלו בהם בתעשיות בירה, יין ואלכוהול, מצא פסטר דרך ליצור קשר הדוק בין הביולוגיה לכימיה. סטיות בתסיסות, 'מחלות' של בירה ויין, גרמו להיווצרותן של תרכובות אסימטריות. משמע, שסטיות אלו קשורות בנוכחותם של אורגניזמים חיים. לדעת פסטר, הלא־נורמלי, הפתולוגי, איננו משמש מודל לפיסיולוגיה. הוא נותן בסיס לניסוי. הוא מצביע על התופעה שהחקירה משנה לתהליך פיסיולוגי. אנומליות בתסיסה הן פשוט טיפוסים אחרים של תסיסה. תהיה התסיסה כוהלית, אמילית, 'צמיגה', אצטית, לקטית, בוטירית וכן הלאה, היא תמיד קשורה בהתרבותם של אורגניזמים מיקרוסקופיים. 'תססים אמיתיים הם יצורים מאורגנים', אמר פסטר.⁵¹ יתרה מזו, בכל סוג של תסיסה ניתן למצוא טיפוס מסוים של אורגניזם שניתן לבדוד, לגדל ולחקור אותו. במצע נתון, היחודיות של האורגניזם המעורב בפעולה היא

הקובעת את יחודיות הריאקציות הכימיות, ואי לכך של התסיסה. אין משמעו של דבר, שחומר אחד איננו יכול להיות מותסס על-ידי כמה אורגניזמים שונים, או שאורגניזם נתון איננו יכול להתסיס חומרים שונים רבים. למעשה, טווח שלם של תרכובות נוצרו על-ידי תסיסה; כלומר, הספקטרום השלם הוא האופייני לאורגניזם. לדעת פסטר, 'לכל תסיסה אפשר להקצות משוואה במעין דרך כללית, אולם משוואה שבפרטי פרטים רבים אחראית לאלף הווריאציות הקשורות לתופעות החיים.'⁵² תסיסה מיקרובית דומה לתזונה אנימלית: שתיהן משקפות פעילויות כימיות של האורגניזם החי.

כמה שונה גישה זו ממה שקדם לה. היא לא רק שינתה את טבעם של הקשרים בין הביולוגיה לכימיה; היא שינתה גם את התמונה הכללית של עולם-החי, את היחסים הקיימים בין יצורים חיים, ואת חלוקת התפקידים בפעילויות הכימיות על-פני כדור-הארץ. לפתע, העולם הבלתי-נראה, שהתגלה בשלהי המאה ה-17 על-ידי המיקרוסקופ, אך עד כה לא נעשה שימוש בו וכמעט התעלמו ממנו, מצא מקום, מעמד, תיפקוד. לנקודת-המבט של פסטר היו שני פנים, שאותם פיתח במקביל. מצד אחד, יחודיותו של המיקרואורגניזם קבעה את טבע התסיסות, כפי שסיבה גורמת מסובב. מושג היחודיות התרחב אז לתחום בלתי-צפוי, לפתולוגיה: שורה שלמה של מחלות באדם ובבעלי-חיים נחשבו מעתה לתוצאה של פלישת 'נבט' מסוים לתוך האורגניזם. כה רב היה הביטחון בנכונות העיקרון הזה, עד שנחשב לתקף גם במקרים שלא ניתן היה להבחין ב'גורמים' האתראיים לדבר – שנודעו מאוחר יותר כווירוסים – וגם לא לגדל אותם במבחנה. מצד אחר, נמצאה זיקה בין ההשפעות הכימיות של חומרים חיצוניים או של אורגניזמים ובין האופי החי של הגורם שמדובר בו. אפשר היה להפך את סוגיית התסיסה ולבטא את השאלה בדרך חדשה. 'אחד משני דברים יכול לקרות', ציין פסטר,

בשעה שתססים בתסיסות של ממש הם מאורגנים: אם חמצן בלבד, כחמצן, יוצר אותם על-ידי מגע עם חומרים חנקניים, אזי הם בריאות ספונטניות; אם תססים אלה אינם יצורים ספונטניים, אזי החמצן לוקח

חלק בהיווצרותם, לא כחמצן בלבד אלא כסטימולנט של גבט שהוכנס בו־בזמן עם הגז, או שכבר נמצא קודם לכן בחומרים התנקניים או בחומרים שניתן להתסיסם.⁵³

בכך שערך ושיכלל את הניסויים שערך ספאלאנצאני בעבר ונקט את דייקנותו של הכימאי, ביטל פסטר לבסוף כל אפשרות של בריאה ספונטנית: אפילו באורגניזמים מיקרוסקופיים, החי נולד רק מהחי. בכל מקום שנמצאים בְּצִילִים, משמע שגם לפני־כן היה קיים בצילוס זהה כדי לגרום להופעתם.

אולם גם אם הצליחו לגרש סוף־סוף את שֵׁד הבריאה הספונטנית, הרי שֵׁד הוויטליזם נשאר נטוע בחוזקה כמו בעבר. למעשה, בשלהי המאה ה-19 ניצב לפני החוקרים פרדוקס: מצד אחד, הכימיה האורגנית והכימיה הפיסיקלית סירבו להעניק מעמד מיוחד לכימיה של האורגניזמים; מצד אחר, הקריסטלוגרפיה גילתה תכונה מיוחדת השייכת רק לרכיבים של אורגניזמים חיים, והמיקרוביולוגיה ראתה את התסיסה כתכונה של התא החי. מצב זה הביא לפלמוס בלתי־פוסק, שהיה ספוג בכל הלהט שהצטיינה בו כל־כך המאה ה-19. שהרי הוכר זה מכבר בקיום 'דיאסטוזים' מסויסים: חומרים המתווכים בין פירוק סוכרים מסוימים ובין תרכובות אלבומיניות שבמבחנה, בהעדף אורגניזם חי. לכן צריך היה להבחין בין שתי מחלקות של תססים: 'מאורגנים' ו'בלתי־מאורגנים'. אולם בעיה זו נפתרה על־ידי הכימאים ממש בסופה של המאה ה-19. הם הצליחו למעוך תאים, להכין תמציות תאיות ולחפש תססים. על־ידי טחינה של גוש שמרי־אפיה יבשים עם חול, מצא בִּיכְנָר, כי 'מיץ שמרים', שסולקו ממנו כל התאים החיים על־ידי סינון, עדיין יכול להפוך גלוקוזה לכוהל.

ליצירת תהליך התסיסה, אין צורך באפרט כה מורכב כפי שהדבר מיוצג על־ידי תא השמור. קרוב לוודאי שה'גורם' של התמצית, הפעיל בתסיסות, הוא חומר מסיס, ללא ספק אלבומינואיד.⁵⁴

כל התססים המוכרים מתנהגים איפוא באותו אופן. כולם חומרים, לא יצורים חיים. כולם פועלים מחוץ לאורגניזם. עבודתו של ביכנר

סללה את הדרך לגילויים של תססים רבים אחרים, היכולים לזרו באופן יחודי מיגוון רחב של ריאקציות. יתרה מזו, עם התפתחות הכימיה הפיסיקלית איבדה הקטליזה די הרבה מהמיסתורין שלה. הכימאים למדו איך למדוד את הפרמטרים של ריאקציה כימית, את הקצב שלה, ואת שיווי-המשקל וההפיכות שלה. קטליזה משפיעה רק על אחד מהפרמטרים האלה: היא מגבירה את הקצב, בדיוק כפי שעושה זאת עליה בטמפרטורה. ובניסוחו של אוסטוואלד,

קטליזה היא השם שניתן לתהליכים שבהם קצב הריאקציה משתנה על-ידי נוכחותו של חומר, אשר בסוף הריאקציה נמצא באותו מצב כפי שהיה בתחילתה. חומרים אלה רק משנים את קצב הריאקציה; אין הם נוטלים בה חלק.⁵⁵

תופעות קטליטיות אינן מוגבלות כלל לכימיה של החי. יש חומרים אי-אורגניים, למשל מתכות כבדות כמו פלטינה שחורה, אשר בגלל שטח-הפנים העצום שלהן מורזות שורה שלמה של ריאקציות. הדיאסטזים שונים מְזָרִים אי-אורגניים מעין אלה בעיקר בגלל הספציפיות שלהם: הם מפעילים רק ריאקציה אחת ויחידה. וכך נעלם המכשול, אשר מאז ימי לבואזיה הגביל את חקר הריאקציות הכימיות באורגניזמים חיים. התהליכים המתחוללים באורגניזם נעשו כרופים לחוקי הדינמיקה הכימית.

ביכנר הראה שאפשר להפוך סוכר לאתנול על-ידי תמציות אל-תאיות, ודבר זה היה חשוב לא רק משום שבכך שפך אור חדש על הכימיה של החי, אלא מעל לכול משום שהמציא שיטת אנליזה חדשה. ברקמות וגם בתאים שלמים קשה לעתים קרובות, ולפעמים אף בלתי-אפשרי, להחדיר תרכובות מסוימות דרך קרומי התא. לעומת זאת, בתמציות תאיות קל יחסית להתערב בריאקציה: אפשר להוסיף או לגרוע תרכובות שלדעת החוקרים עשויות לקחת חלק בריאקציה; גם ניתן לבדוק את ההשפעות של מעכבים אפשריים. אין זה מוגזם לומר, שמאותו זמן ואילך חקירת תמציות אל-תאיות היא השיטה העיקרית שכימאים משתמשים בה בחקר היצורים החיים. וכך הסתעף בתחילת המאה ה-20 ענף חדש של הכימיה: כימיה ביולוגית או ביוכימיה. הכימיה האורגנית המשיכה

לחקור את משפחות הנגזרות הפתמניות, ללמוד את תכונותיהן ולייצר תרכובות חדשות על-ידי סינתזה. לעומת זאת, הכימיה הביולוגית חקרה את רכיביהם של היצורים החיים ואת הטרוספורמציות שלהם בהקשר לתיפקודיות של האורגניזם. בהיותה ממוקמת בלב-לבה של הביולוגיה, הביוכימיה קשורה לכל תחומיה האחרים של הביולוגיה. אולם היא נבדלת מהם בשיטות, במושאי המחקר ואפילו בדרך בחינת האורגניזם. כשנהרס הארגון של גוף חי, החיים פוסקים, אך לא כל הביטויים האחרים שלו. התפוררות האורגניזם מפסיקה תופעות מסוימות, כמו התרבות וגדילה; אך היא מאפשרת המשכתן של תופעות אחרות, למשל תסיסה. לדעתו של לב, תפקידה של הביוכימיה הוא איפוא, 'להבחין בין התיפקודים התלויים אך ורק בהרכב הכימי ובין אלה הזקוקים למבנה פיסיקלי מסוים של החומר החי'.⁵⁶

אפשר להבחין בשני זרמים בראשית התפתחותה של הכימיה הביולוגית. הראשון שאף להגדיר את טבעו הכימי של התא ולערוך אנליזה ל'פרוטופלסמה' במונחים פיסיקליים-כימיים. באותה תקופה, גבולות האנליזה המבנית נקבעו על-ידי כוח ההפרדה של מיקרוסקופ האור. ניתן היה לראות בתא מבנים כמו הגרעין, קרום התא, המיטוכונדריה וכו'. נדמה היה של'פרוטופלסמה' אין מבנה של ממש; היא היתה מעין אמולסיה, תרחיף של גרגולות או 'מיצלות' בנוזל, מה שנקרא בשם קולואיד. לדעת לב, 'החומרים המרכיבים חומר חי, יהיו הם נוזל או מוצק, הם קולואידים'.⁵⁷ קולואידים, שלא כמו קריסטלואידים, אינם סגולה של אורגניזמים חיים בלבד: אפשר להכין אותם במעבדה על-ידי הכנת תרחיף של חלקיקי זהב או פלטינה במים, למשל. תרחיף כזה ניתן באיכויות מיוחדות: יציבות, שטח-פנים ומטענים חשמליים המעודדים ריאקציות כימיות ותורמים לקטליזה. תרכובות אלבומיניות ושומנים שמוצו מאורגניזמים שונים יוצרים בקלות תמיסות קולואידיות. לבסוף, חוץ ממיגוון המבנים שניתן לראות באורגניזמים חיים בעין בלתי-מזוינת או דרך המיקרוסקופ, טבעה הקולואידי של הפרוטופלסמה הוא הנותן לתאים את אופיים המיוחד. 'החיים תלויים בקיומן של תמיסות קולואידיות מסוימות', אמר לב, 'כל החומרים הגורמים לגלגליה כללית גם

גורמים לעצירת החיים.⁵⁸ זה מה שקורה כאשר אלבומינים נקרשים על-ידי חום או בהשפעת פעולתן של מתכות כבדות. הריסת המבנים הנראים, תוך שימור טבעה הקולואידי של הפרוטופלסמה, צריכה לאפשר את חקר הפרוטופלסמה. אולם בתחילת המאה ה-20 לא די היה באמצעים שעמדו לרשות הביוכימיה לבצע זאת. רק עם התפתחות השיטות הפיסיקליות, במיוחד אולטרה-צנטריפוגציה, נעשה אפשרי לפרש את תכולת התאים במונחים של מולקולות ולא של קולואידים.

הזרם השני בביוכימיה שאף לחקור את רכיבי התא והריאקציות שלו, בעקבות הדרך שהצביע עליה ביכנר. נקודת התקיפה הראשונה היתה קביעת השלבים השונים בפירוקה של גלוקוזה על-ידי שמרים. אולם במהרה התרחבו מחקרים אלה לריאקציות אחרות; דרך זו של אנליזה ביוכימית התקדמה בצעדי ענק בתחילת המאה שלנו. שיטתה העיקרית היתה הפרדה זהירה של אורגניזמים, רקמות או תאים ו'פתחתם' בעדינות מרבית כדי להגיע לתכולת התא. משעה שזוהה תהליך, בתיווכה של תמצית מעין זו, ניסו הביוכימאים להגדיר את הריאקציות המרכיבות אותו, לבודד את התרכובות הנוטלות בו חלק ולנקות אותן בשיטות מעבדתיות. היעד היה לשחזר את הישות שנהרסה, לאחד את מה שהופרד, לפתח 'מערכת' שאפשר יהיה ללמוד את תכונותיה, למדוד את הפרמטרים שלה, ולהגדיר את דרישותיה. ואז ניתן יהיה לייצג את הריאקציה על-ידי סימול כימי. גישה זו, שהיא צמצומית בעיקרה, הבדילה ברורות בין הביוכימיה ובין שאר תחומי הביולוגיה. ואכן, ביולוגים אחרים העבירו לעתים קרובות ביקורת על הביוכימאי על שום שהוא חוקר מושאים שכבר אין להם דבר במשותף עם אורגניזמים חיים, יוצר אֶרְטֶפֶקְטִים, ומנסה להסביר את השלם במונחים של חלקיו: בקיצור, על שהוא מסיק מסקנות שגויות מהאנליזות שלו. אם כי היה חמוש במידה מסוימת כנגד ביקורת מעין זו, הביוכימאי ניסה בכל זאת להדוף את ההתקפות; הוא השווה, בכל שלב של האנליזה שלו, את התופעות הנצפות במבחנה עם אלו המתרחשות באורגניזם.

הביוכימאים השתמשו ברקמות של בעלי-חיים או בתרביות של

מיקרואורגניזמים להכנת תמציותיהם. גם במקרה זה, מושאים מסוימים, כמו כבד של חולדה, שריר של יונה או תרחיפים של שמרים סיפקו חומר מועדף ביותר, בשל זמינותם ונוחות העבודה אתם. בתמציות כאלה ניסו הביוכימאים לזהות מולקולות ולהגדיר ריאקציות. את החומרים המרכיבים רקמות חיות ניתן לחלק לשלוש קטיגוריות כימיות עיקריות: סוכרים או פחמימות, שומנים או ליפידים, אלבומינואידים או חלבונים. בכל מחלקה קיימות מולקולות קטנות וגדולות. מאחר שהמולקולות הגדולות, במיוחד חלבונים, היו בלתי יציבות וקשות להכנה, לבידוד ולאיפיון, עדיין לא היה נוח לחקור אותן. באותו זמן גם הטכניקות והמושגים לא התאימו לצורך זה. לעומת זאת, המולקולות הקטנות היו נוחות לחקירה בשיטותיה של הכימיה האורגנית. אפשר היה לנקות אותן ולערוך להן אנליזה, ללמוד את תכונותיהן ולעקוב אחרי הטרנספורמציה שלהן במהלך חילוף החומרים. במקרים רבים אף ניתן היה לסנתז אותן. כתוצאה מכך הכירו הביוכימאים מספר רב ומיגוון גדל והולך של מולקולות כאלה ושל הריאקציות שבהן הן לוקחות חלק באורגניזם. במעבדה, ריאקציות אלו מתחוללות באיטיות רבה בטמפרטורת הגוף. אולם לכל ריאקציה נמצא זרז ביולוגי מיוחד, דיאסטז, או 'אנזים' כפי שהוא נקרא מעתה ואילך, אשר הגביר את הקצב אלפי מונים. הקינטיקה והתכונות של אנזימים נחקרו והוגדרו. לאט לאט נמצאו האנזימים המתאים לכל ריאקציה מוכרת. כל אנזים נקרא על שמו של הסובסטרט שלו, שאליו היתוספה הסיימת - 'ase'. בדרך זו נמצאו אנזימים לפירוק של כל מחלקת תרכובות - סוכראזות, ליפאזות ופרוטאזות. בתוך כל מחלקה, סוכראזות למשל, יש אנזימים מיוחדים לכל טיפוס של פחמימות: עמילאז, לקטאז, סכראז, וכן הלאה. אף נמצאו אנזימים, כמו מלטאז, היכולים לא רק לפרק סוכר, אלא בתנאים מסוימים גם לסנתז אותו מחדש מתוך תוצרי פירוקו. אף היו אנזימים האחראים לתהליכי הנשימה. מאז עבודתו של לבואזיה, נשימה נחשבה לטיפוס מיוחד של בעירה, המתחוללת באיטיות בטמפרטורת הגוף. אולם כבר בראשית המאה ה-20 נחשבה נשימה לתוצאה של פעילויות אנזימטיות מיוחדות, המזרזות את החימצון האיטי של חומרי מזון בשלבים רציפים קטנים. למעשה, חומרי המזון מתעכלים תחילה; ואחרי-כך תוצרי העיכול מתחמצנים על-ידי

יציאתם של אטומי מימן. חימצונים וחיזורים מצומדים באמצעות מולקולות קטנות, היכולות להתחמצן או להתחזר במהירות גבוהה, לסירוגין. נשימה הפכה איפוא לשורה של ריאקציות חימצון-חיזור, אשר כל אחת מהן מזורזת על-ידי אנזים: אלקטרונים מועברים לאורך שרשרת המתחילה במטבוליטים ומסתיימת בחמצן מולקולרי. בתסיסה, המתקיימת בהעדר חמצן, תרכובות אורגניות מסוימות נוטלות את מקומו של החמצן המולקולרי. אולם תמיד מוצאים אנזים מסוים המזרז ריאקציה מסוימת. הספציפיות של פעולה קטליטית בכימיה של האורגניזמים החיים היתה כה גבוהה, שאפשר היה לתארה במימרה: ריאקציה אחת, אנזים אחד. ולהיפך, משעה שהוגדרה פעולתם של האנזימים, הם סיפקו לכימיה נשק חדש למטרות אנליזה וסינתזה. בעזרת האנזימים שאיפייך, יכול היה הביוכימאי לטפל במולקולות הקטנות של התא כרצונו, מקטין או מגדיל אותן במדויק, מסלק אטום כאן, מוסיף רדיקל שם. בדרך זו רכש הביוכימאי ביטחון ומיומנות טכנית שקשה היה לחזותם מראש.

וכך, מצוידת בחומרים חדשים ובשיטות חדשות, פיתחה הביוכימיה סדרה שלמה של מושגים חדשים. ראשית, גילוי מספר הולך וגדל של תרכובות וריאקציות הביא לרעיון של 'מסלול מטבולי', שהוגדר כסך כל הריאקציות שבאמצעותן נהפכים חומרי מזון לתרכובות יחודיות. היה ברור זה מכבר, שחומר מזון אינו מכיל את כל התרכובות שאורגניזם או תא מורכבים מהן. תחילה צריך היה חומר המזון להתפרק, ומן התוצרים שהתקבלו בדרך זו להרכיב לאחר מכן תרכובות יחודיות. כבר בימיו של פסטר התבהר דבר זה מתצפיות בגדילה של מיקרואורגניזמים: שמר, למשל, יכול להיכפל במצעים כימיים מוגדרים, המכילים מלחים מינרליים ותרכובת אורגנית יחידה, כמו גלוקוזה, המשמשת מקור של פחמן ושל אנרגיה. מרגע שנכנסה לתא, צריכה הגלוקוזה להסתדר כימית מחדש, כדי ליצור את כל התרכובות ההכרחיות לצמיחתו ולחיון של השמר. הטרנספורמציות האלה אינן מתרחשות סימולטנית. ניתן להפרידן לכמה שלבים, שכל אחד מהם פשוט ונגיש לאנליזה. הן תואמות איפוא לשרשרות של ריאקציות, שמעורבות בהן שורה שלמה של תרכובות ביניים, שבדרך-כלל אינן ממלאות שום תפקיד

פיסיוולוגי מיוחד, אלא כל אחת מהן היא התוצר של ריאקציה אחת והסובסטרט של הריאקציה הבאה. תחילה מותקפים חומרי המזון על־ידי אנזימים יחודיים, המפרקים אותם, קוטעים אותם והופכים אותם למולקולות קטנות. בתורן, המולקולות הקטנות משמשות סובסטרטים לאנזימים אחרים, אשר מעצבים אותן מחדש, מוסיפים אטומים, מתליפים רדיקלים, מאריכים וקושרים את המולקולות – בקיצור, אשר מייצרים את הרכיבים האופייניים של האורגניזם. באופן זה, האורגניזם נעשה מעין מפעל כימי שרוחשות בו המוני מולקולות קטנות, שנוצרו מחומרי מזון בשרשרות של פירוק, ואחר־כך הופכים לתרכובות יחודיות על־ידי שרשרות של סינתזה. יתרה מזו, לעתים קרובות מוצאים את אותה שרשרת מטבולית באורגניזמים שונים. למשל, בהתפרקות גלוקוזה במהלך התססתה על־ידי שמרים, ובמהלך התכווצות של שרירים בהעדר חמצן, מעורבים אותם ריאקציות וחומרי ביניים. וכך הובהרה אחדותה של הכימיה בעולם־החי.

חומרי מזון צריכים לספק לאורגניזם אנרגיה וגם חומרי בניין. כאשר שָׁמֵר משתמש בסוכר לצורך צמיחתו, יהיה זה בנוכחות חמצן או בהעדרו, על־ידי נשימה או על־ידי תסיסה, רק חלק מהסוכר שנוצר הופך למרכיבים של השמר. השאר מספק את האנרגיה הנחוצה לעבודתו. כדי שמספרם של האורגניזמים יגדל וייכפל, לקיום הסדר של עולם־החי, למרות נטייתו של היקום לדעוך, צריך לספק להם אנרגיה ממקור חיצוני. בטווח הארוך, השמש היא המספקת את האנרגיה למרבית היצורים החיים. אולם לפרטים־יחידים מקרב האורגניזמים יש אמצעים שונים להבטחת הספקה של אנרגיה לעצמם. אחדים מהם, כגון צמחים ירוקים, קולטים את האנרגיה שלהם ישירות מאור השמש בתהליך הפוטוסינתזה; אחרים, כגון חיידקים מסוימים, משיגים אנרגיה מחימצון של תרכובות אי־אורגניות; ואילו עוד אחרים, כמו מרבית בעלי־החיים, משיגים אנרגיה מחימצון של תרכובות אורגניות. אבל בכל מקרה ומקרה, כדי שתהיה זמינה בעת הצורך, צריך לאחסן אנרגיה בצורה כימית. הביוכימאים מצאו שהיא נאצרת בתרכובות זרחניות מסוימות, המכילות מה שנקרא 'קשרים עתירי־אנרגיה'. באמצעות ההיווצרות, הסינתזה וההעברה של קשרים כאלה, האנרגיה של

מערכות ביולוגיות נאגרת, משתחררת או משתחלפת. בסיכומו של דבר, תרכובת אחת מיוחדת במינה, המשותפת לכל עולם־החי, אֶדְנוֹזין תלת־זרחני (ATP), מהווה את מאגר האנרגיה בכל האורגניזמים. יהיו אלו חיידקים או יונקים, ויהיה מקור האנרגיה בנשימה או בתסיסה, בכל מקרה פירוק הסוכר נעשה תמיד בשורה של פעולות דומות; אותם שלבים ואותן ריאקציות מובילים ליצירת אותה תרכובת עתירת־אנרגיה. דבר זה מחזק את התפישה בדבר אחדות התיפקוד בעולם־החי.

מכאן ואילך גם אפשר היה לגתח את תזונת האורגניזמים, להגדיר את הדרישות התזונתיות שלהם ולקבוע מה הכרחי לגדילה ולהתרבות. נראה שתרכובות מסוימות, הקרויות 'ויטמינים', הכרחיות לבריאותם וחייהם של יונקים. תרכובות אחרות, הקרויות 'גורמי גדילה', נחוצות להכפלתם של מיקרובים מסוימים. בנוסיון להגדיר את סוג התרכובות הדרושות לאורגניזמים כה שונים כמו חיידקים ויונקים, הפיסיולוגים והביוכימאים הבחינו באנלוגיות מוזרות: לעתים קרובות, 'גורמי הגדילה' הנחוצים לחיידקים היו זהים ל'ויטמינים' ההכרחיים ליונקים. יתרה מזו, תרכובות אלו נמצאו לא רק באותם אורגניזמים הזקוקים להם כחומרי מזון, אלא בכל האורגניזמים. יש אורגניזמים המסוגלים לסנתז את כל התרכובות בעצמם, ואילו האחרים אינם יכולים לעשות זאת. צריך איפוא לספק לאחרונים מן המוכן את הרכיבים שאינם יכולים לייצר בעצמם. מכאן הרעיון של 'מטבוליטים חיוניים', הנחוצים לחייהם של כל האורגניזמים. מעתה לא רק התיפקודיות של האורגניזמים ביטאה את אחדותו של עולם־החי, אלא גם הרכבם.

בחלקה הראשון של המאה ה-20, הכימיה של האורגניזמים החיים נעשתה איפוא נגישה לעריכת ניסויים. מאות ריאקציות נבדקו במבחנות. נבחן מספר ניכר של תרכובות פשוטות יחסית. לאחר מכן נחקרו הטרנספורמציות שסיפקו את מאגרי האנרגיה וחומרי הבניה. ככל שהוגדרו ריאקציות אלו בדקדקנות רבה יותר, כן התקשו להבחין בינו לבין הריאקציות שנערכו במעבדה. מקוריות הכימיה של יצורים חיים היתה מצויה בעיקר באנזימים. הודות ליחודיותה, דיוקה ויעילותה של הקטליזה האנזימטית ניתן היה לבצע את רשת

כל הפעולות הכימיות בשטח העבודה הזעיר של התא. דרגת הברירנות הגבוהה, המאפשרת לכל אנזים לבחור רק באיזומר אופטי אחד של תרכובת נתונה, היא שהעניקה אסימטריה לכימיה של האורגניזמים. בגסותם לאפיין את האנזימים ולקבוע את טבעם ואופן פעולתם, הביוכימאים החלו קושרים בהדרגה פעילויות אנזימטיות עם נוכחותם של חלבונים. בסופו של דבר, כל פעילות אנזימטית מוגדרת הפכה לסגולה של חלבון מסוים. אם אצרה הכימיה של היצורים החיים סוד, משמע שהוא טמון בטבעם ובתכונותיהם של החלבונים. ואף-על-פי שניתן היה להסתפק בהחלט בשיטות הביוכימיות לצורך אנליזה של מולקולות פשוטות יחסית, לא די היה בהן לצורך אנליזה של המולקולות הענקיות האלו. מולקולות החלבון הבלתי-יציבות עברו בקלות דנטורציה. מאחר שהתקשו לטפל בהן, לא ניתן היה לחקור אותן בעזרת הטכניקות המקובלות. בפירוק כימי הן נתנו מעט מאוד מולקולות פשוטות, 'חומצות האמינו', שכמה מאות מביניהן, כך נדמה היה, קשורות יחד זו לזו במולקולת חלבון אחת. בהדרגה הומצאו שיטות חדשות להכנתם של חלבונים, בידודם וניקויים. אפילו התאפשר לגבש אנזימים-חלבונים מסוימים. כך סולק מחסום נוסף בין שני טיפוסי הכימיות. אולם חלבונים עדיין נשאו מבנים מורכבים עד מאוד. הביוכימיה עדיין לא מצאה נתיב-גישה למבנה של מולקולות כה גדולות, לארגון של חומצות האמינו, המאפשר להן לקשור באורח כה יחודי מולקולה מסוימת אחת ולא אחרת, ולזרז את הטרנספורמציה שלה. האנליזה של חלבונים תבעה טכניקות ומושגים חדשים. רק במחצית המאה ה-20 עתידה היתה להופיע המתודולוגיה המתאימה, תוצר של ההשפעה המשולבת של פיסיקה, כימיה של פולימרים ותיאוריית האינפורמציה.

*

בתחילת המאה ה-20 פנתה הביולוגיה לכיוון חדש בהשפעת שני מדעים חדשים, גנטיקה וביוכימיה. ראשית, שניהם תרמו למחקר קפדנות כמותית שלא היתה מוכרת עד אז בביולוגיה: מעתה כבר לא די היה להבחין בקיומה של תופעה, אלא צריך היה לאמוד את הפרמטרים שלה – למדוד מהירויות של ריאקציה או שכיחויות של

רקומבינציה גנטית, לקבוע את קבועי שיווי-המשקל או את קצבי המוטציה. שנית, הגנטיקה וגם הביוכימיה הסיטו את מרכז הכובד של הגופים החיים. מעתה כבר לא נחשבו אורגניזמים אך ורק לאיברים ולתיפקודים המסודרים בעומק, וגם לא נראו עוד כמקופלים סביב מקור-חיים כלשהו, שממנו מוקרן ארגון. לדידה של הביוכימיה, פעילותו של האורגניזם מצויה בכל התא, באלפי הטיפות הקולואידיות שבהן מתחוללות ריאקציות כימיות ונבנים מבנים. לדידה של הגנטיקה, פעילותו של האורגניזם מתרכזת בגרעין התא, בתנועת הכרומוזומים, שבהם נקבעות צורות, מאורגנים תיפקודים ומונצח המין. כל מדע התייחס למודל משלו. מצד אחד, הכימאים דיברו על מבנים מולקולריים וקטליזה אנזימטית; הם הסבירו כיצד אורגניזמים משיגים את האנרגיה שלהם מהסביבה, ובדרך זו פועלים כנגד ההפחתה הטבעית של האנרגיה: מעתה כבר לא דובר אך ורק על זרימה של חומר דרך האורגניזם, אלא גם על זרימה של אנרגיה. מצד אחר, הגנטיקאים תיארו את האנטומיה והפיסיולוגיה של מבנה מסדר שלישי המצוי בכרומוזומים; הם ייחסו את הזיכרון של המין לקשיחותו של מבנה זה, ואת הופעתם של מינים חדשים לשינויים החלים בו. תכונותיהם של אורגניזמים חיים התבססו, בסופו של דבר, על שתי ישויות חדשות: מה שהביוכימאים כינו בשם חלבון, והגנטיקאים – גן. הראשון הוא היחידה המבצעת את הריאקציות הכימיות ונותנת לאורגניזמים חיים את המבנה שלהם. השני הוא יחידת התורשה, המפקחת על הרפרודוקציה ועל הווריאציות של התיפקוד גם יחד. הגן נותן פקודות. החלבון מבצע אותן.

לקראת מחצית המאה ה-20 נמצאו הגנטיקה והביוכימיה באותה נקודה, פחות או יותר. שתיהן הצליחו לגלות את אחדות הפעולה שבמרכזו של התחום שלה עצמה. לפיכך ידעו שתיהן מהו המושא העומד לחקירה. אבל לשתיהן חסרו האמצעים הנדרשים להצלחה. למעשה, לפני מלחמת העולם השנייה היתה הביולוגיה מדע ממודר למדי. כל מומחה התמודד עם הבעיות שלו והשתמש בחומרים שלו. לפעמים, באותו מכון, לעתים אף באותה קומה, יכלו להימצא שני מדענים, שאחד מהם חקר גנים והשני מולקולות. הגנטיקאי הסיק שבכרומוזומים צריך להיות נוכח תומר המסוגל לבצע פעולות

יוצאות מגדר הרגיל: מצד אחד, הוא צריך לקבוע את המבנים ואת התיפקודים של אורגניזמים חיים; מצד אחר, הוא צריך ליצור עותקים מדויקים של עצמו, מבלי שתימנע האפשרות להיווצרות וריאציות גדירות. הכימאים מצאו שני סוגי חומר בגרעין התא: חלבונים ואת אותה חומצה אשר מיישר כינה במאה הקודמת 'חומצת גרעין'. אולם המבנה של חומצת הגרעין עדיין היה כמעט בלתי ידוע. הוא היה מורכב מארבע מולקולות מוגדרות, שני 'בסיסים פוריניים' ושני 'בסיסים פירימידיניים', שכל אחד מהם קשור לסוכר ולקבוצה זרחנית ליצירת 'נוקליאוטיד'. ארבע התרכובות היו מאוגדות ליצירת 'טרנאנוקליאוטיד'. נראה שחומצת הגרעין היא סוג מולקולרי חסר כל גיוון או פנטזיה, ולפיכך נעדר יכולת לשחק ולו את התפקיד הקטן ביותר בתורשה. לכן יוחס תפקיד זה לחלבונים, אף על פי שתכונותיהם לא נראו כמתאימות כלל למטלה זו. דומה שבגלל מורכבותה התורשה היא מעבר לתחום פעולתה של הכימיה הניסויית. ולפי ג'.ס. הולדיין:

ככל שאנו מרבים לגלות על אודות הפעילות הפיסיולוגית ועל ההורשה, כן אנו מתקשים לדמיין תיאור או הסבר פיסיקלי, או כימי, שיוכל להסביר בדרך כלשהי את העובדות של תיאום מתמיד.⁵⁹

בשלהי המאה ה-19 ובתחילת המאה ה-20 כבר לא נשאר דבר מצורתו הישנה של הוויטליזם, אותו ויטליזם שהביולוגיה בראשית דרכה צריכה היתה לשער, כדי להשיג את עצמאותה. עם התפתחות המדע הניסויי – גטיקה וביוכימיה – לא היה אפשר עוד, אלא אם כן היית מיסטיקן, להתייחס ברצינות לעיקרון שמקורו אינו ידוע – געלם המתחמק מחוקי הפיסיקה בעצם מהותו – כדי להסביר את קיומם ותכונותיהם של אורגניזמים חיים. מעתה נטען, שאם הפיסיקה אינה מסוגלת כנראה להסביר את כל תופעות החיים, אין זה בגלל שמדובר בכוח כלשהו, המיוחד לעולם החי ומצוי מעבר להשגתו של כל ידע; אלא אין היא מסוגלת להסביר זאת בגלל המגבלות הטבועות בתצפית ובחקירה ובגלל מורכבותם של אורגניזמים חיים בהשוואה לחומר דומם. כשם שלא ניתן לצמצם תכונות מסוימות של אטומים למכניקה, כן אולי אי אפשר לפרש איכויות מיוחדות מסוימות של התא במונחים של פיסיקת

האטום. 'לא די שנכיר מה רבה חשיבותם של מאפיינים אטומיסטיים בעיקרם בתיפקודיהם של אורגניזמים חיים, כדי להסביר באופן מקיף תופעות ביולוגיות', אמר נילס בוהר.

השאלה העומדת כאן לדיון היא איפוא, האם כמה מאפיינים בסיסיים עדיין חסרים באנליזה של תופעות טבעיות, לפני שנוכל להבין את החיים על סמך התנסות פיסיקלית... על-פי השקפה זו, צריך לבחון את קיום החיים כעובדת יסוד שלא ניתן להסבירה, אבל צריך להתייחס אליהם כנקודת התחלה בביולוגיה, ממש כשם שקוואנטום של פעולה, המופיע כיסוד אי-רציונלי מנקודת-המבט של הפיסיקה המכנית הקלאסית, מהווה, יחד עם החלקיקים האלמנטריים, את המסד של פיסיקת האטום.⁶⁰

אם כן, מעתה מה שיכול היה לקבוע את גבול הבנתו של עולם-החי כבר לא היה ההבדל בין טבעו של עולם-החי ובין טבעו של עולם-הדומם. מה שקבע את הגבול הזה היתה מוגבלות האמצעים ואף אפשרויות האנליזה שעמדו לרשותנו. יתרה מזו, באורגניזמים חיים, למורכבותם של הרכיבים אין שום דבר משותף עם מורכבותן של המולקולות שחקרו הפיסיקה והכימיה הקלאסיות. אורגניזמים חיים, אמר שרדינגר, אינם מתחמקים כלל מחוקי הפיסיקה, אך אולי כרוכים בדבר 'חוקי פיסיקה אחרים, שאינם ידועים עד כה. אולם משעה שיתגלו, יהוו חלק אינטגרלי של מדע זה ממש כמו של הקודם'.⁶¹ הסוגיה כבר לא היתה איפוא, האם נדרש כוח מיסתורי כדי להצדיק את מוצאם, תכונותיהם והתנהגותם של יצורים חיים. הסוגיה היתה, האם החוקים שכבר נתגלו בעת האנליזה של חומר די בהם כשלעצמם, או שמא צריך לגלות חוקים חדשים. כדי להיות למדע, הביולוגיה צריכה היתה להתנתק לגמרי מהפיסיקה והכימיה. אך באמצע המאה ה-20, כדי להמשיך בחקירת המבנה והתיפקודיות של יצורים חיים, היא צריכה היתה לעבוד בשיתוף-פעולה הדוק עם שני המדעים האלה. מן האיחוד הזה נולדה הביולוגיה המולקולרית.

המולקולה

באמצע המאה ה-20 חל שוב שינוי במעמדו של הארגון. עתה, מבנה הרכיבים הוא שקבע את מבנהו של השלם ואת שילובו. ביצורים חיים, הארגון קבור במעמקיהם ונמצא בפרטים הקטנים ביותר של התא. עד אז, למרות נוכחותם של גרעין ושל אברונים שונים, התא נראה כמין 'שק של מולקולות'. אם ריאקציות כימיות רבות לאין ספור יכולות להתרחש בזו אחר זו בתוך התא, וקטליזה אכן אפשרית, הרי זה בעיקר בזכות טבעה של הפרוטופלסמה, אותה רשת שהתקשו להגדירה וכינו אותה קולואידית. לתיאום פעילותם של האיברים והרקמות עומד לרשותם של אורגניזמים מורכבים ציוד מיוחד. העצבים וההורמונים יוצרים בכל הגוף מערך של פעולות-גומלין, המחבר גם את החלקים המרוחקים ביותר בו. אחדות הארגון מתקיימת בזכותם של מנגנונים מומחים, המנטרים את תיפקודיו. ואילו במבנים הפשוטים יותר אין מנגנונים מעין אלה.

עם התפתחות האלקטרוניקה והופעת הקיברנטיקה נעשה הארגון כשהוא לעצמו מושא המחקר בפיסיקה ובתחומי טכנולוגיה שונים. בגלל צורכי המלחמה והתעשייה נבנו מכונות אוטומטיות, שמורכבותן הולכת וגדלה בגלל רצף של שילובים. במכשיר טלוויזיה, בטיל נגד מטוסים או במחשב משולבים חלקים, שהם עצמם תוצאה של שילובים של רמות ארגון נמוכות יותר. כל אחד מהמושאים האלה הוא מערכת של מערכות. בכל אחד מהם,

פעולת־הגומלין בין החלקים מצויה בבסיס ארגונו של השלם. שילוב יכול להתקיים רק בה במידה שיש תקשורת בין החלקים האלה והם משפיעים באורח הדדי על הפעילויות המסוימות שלהם בהקשר מימושו של יעד לטובת הכלל. עד אז, תיאום בין הרכיבים ייצג תכונה השמורה רק למערכות מסוימות. מאז ואילך, לא הפרידו עוד בין ארגון החלקים ובין שילובם. כל אחד היה עצם התנאי לקיומו של האחר, שניהם סיבה ומסובב, בעת ובעונה אחת. פעולת־גומלין מתקיימת רק אם הרכיבים מגיבים זה לזה. יש השפעה הדדית בין הרכיבים רק בה במידה שהמערכת משולבת. אם שיחלופים אפשריים בין יסודותיו של גוף מאורגן, הרי זה משום שהמבנה שלהם מאפשר זאת. אולם בה בעת, הארגון של היסודות האלה מכיל בכוח את רצף סידורם־מחדש בזמן, ולפיכך את רצף הטרנספורמציות שלהם. בסופו של דבר, תיאום הפעילויות קובע לא רק את תכונותיה של מערכת משולבת, אלא גם את האבולוציה שלה. היחסים בין מבנים לתיפקודים הוא היוצר את הלוגיקה הפנימית של מערכת כזאת.

האיכויות של יצור חי, הביצועים וההתפתחות שלו מבטאים איפוא את פעולת־הגומלין המתקיימות בין יסודותיו. כל תכונה אופיינית מושתתת על תכונותיהן של ארכיטקטורות מסוימות. אין להפריד את ניתוח התיפקודים מניתוח המבנים: מבנה התאים לתיפקודי הגוף; מבנה המולקולות לתיפקודי התא. אולם כדי לפרש את התהליכים המתרחשים ביצורים חיים על־ידי מבנה המולקולות האופייניות לתא, צריך לשלב את הניתוחים ולצרף את השיטות. במשך מאה שנה התפצלה הביולוגיה הניסויית לענפים ענפים, שנטו להיות מבודדים יותר ויותר. כל ענף התבסס על טכניקות ספורות, אשר הגדירו את גבולותיו של שדה המחקר המיוחד שלו. לעומת זאת, במחצית המאה ה-20 התברר, שהענפים השונים נאלצים לשוב ולהתחבר. ההתקדמות היתה תלויה בהשקעת מאמצים משותפים, בהבהרת גישות, בסיגול שיטות: בקיצור, בכינונה של 'ביולוגיה מולקולרית'. כדי לעסוק בביולוגיה מולקולרית כבר לא היה די בטכניקה אחת, בניתוח תופעה מסוימת, במדידת הפרמטרים שלה. אלא חייבים היו לנצל את כל האמצעים הזמינים להגדרת הארכיטקטורה של התרכובות המשתתפות

בתופעה ואת טיב הקשרים ביניהן. למשל, מעתה כבר לא ניסו לחקור בנפרד גנים, ריאקציות כימיות ותוצאים פיסיולוגיים. צריך היה לתאר את שרשרת האירועים המוליכה מהגן אל התכונה האופיינית בהקשר של סוגים מולקולריים, סינתזות ופעולות גומלין. הארגון של המקרו־מולקולה, ה'מסר' המתקבל עלידי סידורם של דגמים כימיים לאורך שרשרת פולימרית, הוא שאצר את זכרון התורשה, הוא היה מבנה מסדר רביעי, שלפיו נקבעו צורתו של היצור החי, תכונותיו ותיפקודיותו.

בדרך זו, הביוכימיה והפיסיקה, הגנטיקה והפיסיולוגיה הותכו כולן לתורה אחת: ביולוגיה מולקולרית. מעתה, תחום מדעי זה כבר לא יכול היה להיות עניינם של מדענים מסוגרים, שכל אחד מהם שקוע רק בבעיה שלו ובאורגניזם שלו. נדרש מאמץ משותף של בני־אדם וטכניקות כאחד. מומחים באותו מכון, באותה מעבדה, למרות הרקע השונה שלהם, עבדו עתה יחד, ערכו מתקפה משותפת והשתמשו באותו חומר. מעתה לא היו עוד שתי ביולוגיות, אחת המתעניינת באורגניזם השלם והאחרת ברכיביו, אלא היו אך ורק שני היבטים של מושא מחקרי אחד. חוקרי הביולוגיה המולקולרית עדיין בחנו את 'הקופסה השחורה' מבחוץ, כדי לצפות בתכונותיה; אך ב־בזמן הם פתחו את הקופסה כדי לגלות את גלגליה־השיניים, לפרק אותם ולנסות לשחזר את המנגנון מחלקיו הנפרדים. אורגניזם או רכיבים, את כל אחד מהם אפשר לפרש בהקשר למשנהו. לפנים נאלצה הביולוגיה לבודד את עצמה, כדי להגדיר את מושאיה ושיטותיה, ואילו עתה הלכה ויצרה קשרים עם הפיסיקה והכימיה; קשרים שלא גרעו מאומה מאופיה המיוחד.

מקרו־מולקולות

באמצע המאה ה-19 שינו רעיון האנרגיה ורעיון שימור האנרגיה את תמונת עולם־החי. ראשית, בכך שיצרו קשר בין הכימיה של היצורים ובין הכימיה של הדברים; שנית, בכך שנתנו בסיס משותף לפעילויות המגוונות ביותר של כל אורגניזם. אנרגיה נטלה איפוא כמה מתיפקודיו של כוח ויטלי, אם כי לא את כולם. באורגניזם

מורכב יש מיליארדי תאים, ובתא יש מיליוני מולקולות. אבל לא היתה כל דרך להסביר את היחודיות של הארכיטקטורות שלהם, את סידור התאים, וגם לא את מיקום האטומים באיזומרים, אותם חומרים שהרכבם אמנם זהה אך תכונותיהם שונות. מצד אחד, המכניקה הסטטיסטית איפשרה לפרש את התנהגותן הממוצעת של אוכלוסיות גדולות של מולקולות. מצד אחר, הניתוח הגנטי גילה, שהתכונות האופייניות של יצורים חיים אינן תוצאה של אירועים סטטיסטיים, אלא שהן מבוססות על איכותם של חומרים מסוימים המוכלים בכרומוזומים. בניגוד לסדר של גופים דוממים, הסדר של יצורים חיים איננו יכול להתקבל מאי־סדר. הוא תלוי ביצירה מחודשת של סדר שכבר קיים. לדעת שרדינגר, 'דומה שהחיים הם התנהגות מסודרת וממושטרת של חומר, המבוססת לא רק על נטייתו לעבור מסדר לאי־סדר, אלא בחלקה על סדר קיים, שעליו הוא מוסיף לשמור.'¹

באמצע המאה ה-19 פתח המושג 'מידע' את הדרך לניתוחו של סדר זה ולהעברתו. על־ידי התעלמותה מהפרמטרים היחסיים של כל פרטי־יחיד ועל־ידי בחינתה של ההתנהגות הממוצעת של אוכלוסיה בלבד, התרמודינמיקה הסטטיסטית ויתרה על הבנת המבנה הפנימי של מערכת. היא רק יכולה היתה לתפוש כביכול את שטח־הפנים. אולם מתחת לאותו שטח־פנים יכולים להיות חבויים ארגונים שונים מאוד זה מזה. המידע שסיפק הניתוח הסטטיסטי על מערכת נתונה היה איפוא בלתי־שלם, והיה שלם עוד פחות ככל שגדל מספר המבנים הפנימיים שניתן היה לבטאם על־ידי אותה התנהגות ממוצעת. לדעת מקסוול, את המידע זה ניתן להשיג בחינם. מאחר שהאדם איננו ניחן בתפישה תושית, הוא מנוע מקליטתו של המידע; אבל לשד המוכנס למיכל מלא בגז אין שום קושי לאמוד את ערכן של המולקולות ולמין אותן. לעומת זאת, לדעת סילארד ובֶרְיוֹאן, בעד מידע צריך לשלם. השד אינו יכול 'לדאות' את המולקולות, אלא רק אם הוא קשור אליהן בתהליך פיסיקלי כלשהו, למשל קרינה. מה שנוטה לשיווי־משקל איננו הגז בלבד, אלא כל המערכת, המורכבת מגז ומשד. במוקדם או במאוחר, השד נעשה 'עיוור' לגז. הוא יכול להוסיף ולהבחין בחלקיקים רק על השבון אנרגיה כלשהי המסופקת למערכת מבחוץ, בצורה של אור,

למשל. בתמורה, השד משיג את המידע הנדרש על-אודות המולקולות, ועל-ידי מיוגן מקטין את האנטרופיה של המערכת. ואולם בטווח הארוך, האנטרופיה הכללית גדלה. אפילו השד עצמו איננו יכול להתחמק מעוצמתו הכול-יכולה של החוק השני של התרמודינמיקה. המערכת פועלת רק בסדרה של טרנספורמציות רציפות, שמעורב בהן מידע. אנטרופיה ומידע קשורים זה לזה ממש כמו שני צדדיו של מטבע. בכל מערכת נתונה, האנטרופיה משמשת מדד של האי-סדר ושל האי-ידיעה שלנו על המבנה הפנימי; המידע משמש מדד של הסדר ושל הידיעה שלנו. אנטרופיה ומידע מוערכים באותו אופן. זו תשליל של זה, וזה תשליל של זו.

איזומורפיזם זה של האנטרופיה ושל המידע יוצר קשר בין שתי צורות של כוח: הכוח לעשות, והכוח לכוון מה נעשה. במערכת מאורגנת, בין אם היא חיה ובין אם לאו, השיחלופים, לא רק של חומר ושל אנרגיה, אלא גם של מידע, הם המאחדים את היסודות. מידע, בהיותו ישות מופשטת, נעשה נקודת-המיפגש של טיפוס היסוד השונים. הוא בעת ובעונה אחת מה שנמדד, מה שמועבר ומה שמשתנה. לפיכך כל פעולת-גומלין בין פרטים-יחידים בארגון יכולה להיחשב לבעיה בתקשורת. עיקרון זה ישים באותה מידה בחברה אנושית כמו באורגניזם חי או במכשיר אוטומטי. בכל אחד מהמושאים האלה מוצאת הקיברנטיקה מודל שאפשר ליישמו למושאים האחרים: חברה, כי שפה היא מערכת טיפוסית של פעולת-גומלין בין יסודות של שלם משולב; אורגניזם, כי ההומאוסטזה משמשת דוגמה של כל התופעות הפועלות כנגד הנטיה הכללית לאי-סדר; מכשיר אוטומטי, כי הצירופים של מעגליו מגדירים את דרישות השילוב. בסופו של דבר, אפשר לנתח כל מערכת מאורגנת שהיא באמצעות שני מושגים: מסר ובקרת משוב.

מסר פירושו רצף של סמלים שנלקחו מתוך מבחר מסוים – סימנים, אותיות, קולות, פונמות, וכו'. מסר נתון הוא איפוא ברירה מסוימת מבין כל הסידורים האפשריים. זהו סדר מסוים מבין כל אלה שמתירה המערכת-המצורפת של הסמלים. מידע מודד את חופש הבחירה, ולפיכך את האי-היתכנות של מסר; אבל אין הוא מודע

לתוכן הסמנטי. אפשר איפוא להשוות כל מבנה חומרי למסר, היות שטבעם ומיקומם של היסודות המרכיבים אותו, אטומים או מולקולות, הם תוצאה של בחירה שנעשתה מבין סדרה של צירופים אפשריים. על-ידי טרנספורמציה איזומורפית לפי צופן, ניתן לתרגם מבנה כזה לסדרה אחרת של סמלים. אפשר להעבירו על-ידי משדר לכל נקודה על כדור-הארץ שבה ישחזר מקלט את המסר על-ידי טרנספורמציה הפוכה. בדרך זו פועלים הרדיו, הטלוויזיה והשירות החשאי. נורברט וינר אמר, שאין כל מגיעה לומר 'שאורגניזם יכול להיחשב למסר'.²

משוב הוא עקרון-בקרה המאפשר למכונה לכוונן את פעילותה ותיפקודה, לא רק לפי מה שעליה לעשות, אלא גם לפי מה שהיא עושה בפועל. הוא מכניס למערכת את תוצאות פעילותה בעבר. דבר זה מפעיל איברי חישה האחראים להערכת פעילותם של האיברים המוטוריים, לאימות ביצועיהם ולביצוע התיקונים הנחוצים. בקרה זו באה לתקן את נטייתו של המנגנון לאי-ארגון, כלומר, להפוך באופן זמני ובאתר מסוים את כיוונה של האנטרופיה. טווח המורכבות של מנגנונים אלה נע מוויסות פשוט של דוד-חימום לפי טמפרטורת הסביבה, ועד למערכת למידה אמיתית. כל ארגון גזקק ללולאות משוב, המעדכנות כל רכיב על תוצאות התיפקודיות שלו ובכך מכווננות אותו בהתאם לטובת הכלל.

משעה שהתאפשר לבצע באופן מכני סדרה של פעולות שונכתבו בתוכנה, הסוגיה הישנה-נושנה בדבר היחסים בין בעל-חיים למכונה הוצגה במונחים חדשים. 'לשתי המערכות', אמר וינר, 'יש משהו משותף, שכן שתיהן מקיימות את רמת האנטרופיה בעזרת משוב'.³ שתיהן מצליחות על-ידי שיבוש הארגון של הסביבה החיצונית, 'על-ידי צריכת אנטרופיה שלילית', אם נשתמש בביטויים של שרדינגר ובִּרְיוֹאן. למעשה, שתיהן מצוידות במיכשור מיוחד לאיסוף המידע, המגיע ברמת-אנרגיה נמוכה מהעולם החיצוני, ולשנותו בהתאם לתיפקודיות שלהן עצמן. בשני המקרים, המימוש, לא הכוונה, הוא המכוון את פעולת המערכת על העולם החיצוני בתיווכו של מרכז-בקרה. אורגניזם משמר יציבות מסוימת רק בדרך של השאלות רצופות מן החוץ. למרות שינויים בסביבה,

הוא מצליח להתגודד סביב שיווי-משקל האופייני לו עצמו. הוא מצליח לקיים את ההומאוסטזה שלו, משום שמספר רב של מנגנוני-בקרה מאפשרים לו עצמו להגדיר את התנאים המועדפים ביותר לקיומו. כל מערכת מתפקדת, חיה ושאייננה חיה, נוטה להישחק, להתקלקל, להגדיל את האנטרופיה שלה. באמצעות ויסות מסוים, כל הפסד אנרגיה מקומי מקבל פיצוי על-ידי עבודה שמספק חלק אחר של האורגניזם; מכאן עליה נוספת באנטרופיה, אשר היא בתורה מקבלת פיצוי על-ידי עבודה המתבצעת בנקודה אחרת בגוף. וכך הלאה, בכעין מפל, שבו הקטנה בסדר במקום אחד מקבלת פיצוי על-ידי הגדלת סדר במקום אחר. התיאום של המערכת תלוי ברשת מעגלי-בקרה, שבאמצעותם האורגניזם משולב. ואולם כמו במפל, השינוי הכולל באנרגיה של כל הפעולות פונה תמיד באותו כיוון, זה המוכתב על-ידי החוק השני של התרמודינמיקה. הנטיה הסטטיסטית לאי-סדר גורמת בהדרגה לבלייתם של כל מערכת, הסגורה לכל השיחלופים עם העולם החיצוני. בסופו של דבר, התחזוקה של מערכת חיה במצב טוב גובה מחיר: חזרה לשיווי-משקל, שהוא תמיד בלתי-יציב, מביאה לחסר בארגון שמסביב, כלומר, להגדלת האי-סדר של המערכת כולה, המורכבת מהאורגניזם ומסביבתו. לפיכך, היצור החי איננו יכול להיות מערכת סגורה. אין הוא יכול להפסיק לצרוך מזון, לסלק חומרי-פסולת, וגם אין הוא יכול שלא יעבור בו תדיר זרם של חומר ואנרגיה מהחוץ. ללא זרימה קבועה של סדר, האורגניזם מתפורר. אם הוא מבודד, אין הוא יכול אלא למות. כל יצור חי נשאר במובן מסוים מחובר באופן קבוע לזרם הכללי, הנושא את היקום לקראת אי-סדר. הוא מין אדווה מקומית וחולפת, המקיימת את הארגון ומאפשרת לו להתרבות.

בעל-חיים ומכונה, כל מערכת נעשית איפוא מודל לאחרת. אפשר לתאר מכונה במונחים של אנטומיה ופיסיולוגיה. יש לה איברים מוציאים אל הפועל, המשופעלים על-ידי מקור אנרגיה. יש לה סדרה שלמה של איברי חישה, המגיבים לגירויים הבאים מאור, קול, מגע וחותם, כדי לשמור על בריאותה, לחוש את סביבתה ולאמת את תזונתה. היא מכילה מרכזי-בקרה אוטומטיים להערכת ביצועיה; זיכרון שמצויים בו כבר פרטי הפעולות שיש לבצע, וכתובים בו

הגתונים של נסיון העבר. כל זה מחובר על-ידי מערכת עצבים, אשר מצד אחד, נושאת את הרשמים מהחושים אל המוח, ומצד אחר, מעבירה את הפקודות לאיברים. בכל זמן שהוא, המכונה המוציאה אל הפועל את התוכנה שלה מסוגלת לכוון את פעולתה, לתקן או אף להפסיק אותה, בהתאם למסרים שהיא מקבלת.

ולהיפך, אפשר לתאר יצור במונחים של מכונה. וכך, איברים, תאים ומולקולות מאוחדים על-ידי רשת תקשורת. הם משחלפים באופן קבוע אותות ומסרים בין רכיביהם בצורה של פעולות-גומלין יחודיות. גמישות ההתנהגות תלויה בלולאות משוב; נוקשות המבנים תלויה בהוצאה אל הפועל של תוכנה שהוכנה בקפידה. תורשה נעשית העברה של מסר, החוזר ונשנה מדור לדור. התוכנה של המבנים העתידים להיבנות רשומה בגרעין של הביצית. שרדינגר אמר, שהכרומוזומים,

מכילים במעין כתב-צופן את מלוא הדגם של ההתפתחות העתידית של הפרט-היחיד ושל תיפקודיו במצבו הבוגר... ויחד עם זאת, המבנים הכרומוזומיים חיוניים להגשמת ההתפתחות שאותה הם צופים. הם קובץ-חוקים וכוח מוציא אל הפועל – או, אם להשתמש בדימוי אחר, הם תוכנית הארכיטקט ואומנותו של הבנאי כרוכים גם יחד.⁴

הסדר של היצור החי מצוי איפוא במבנה של מולקולה גדולה. מסיבות של יציבות, הארגון של כרומוזום דומה לארגון של גביש. לא המבנה המונוטווי, והמשעמם למדי, שבו אותו דגם כימי חוזר ונשנה עד בלי סוף באותה מחזוריות בשלושת הממדים; אלא מה שהפיסיקאים מכנים בשם 'גביש לא-מחזורי', שבו סידורם של כמה דגמים מאפשר את המיגוון שדורשת רבגוניותם של היצורים החיים. די במספר קטן של דגמים, מוסיף שרדינגר. הצירוף של שני אותות במפתח-מורס מאפשר הצפנה של כל טקסט שהוא. התוכנית של האורגניזם ממופה על-ידי מערכת-מצורפת של סמלים כימיים. התורשה מתפקדת כמו זיכרון של מחשב.

עד מחצית המאה ה-20 בערך, מבנה המקרומולקולות נשאר כמעט בלתי-נגיש. הוא נעשה מושא הניתוח – שוב! – בזכות

שיתוף־פעולה בין־תחומי: מצד אחד, הטכנולוגיה, שמצאה בפולימרים מקור של חומרים חדשים לתעשייה; ומצד אחר, הפיסיקה והכימיה, אשר ניסו לנקות מקרומולקולות, לקבוע מהו הרכבן ולהגדיר את ארגונן. הימצאותם של פולימרים ביצורים חיים היתה ידועה כבר בראשית המאה ה-19. למעשה, בכמה הזדמנויות שמו הכימאים לב, שבעת הידרוליזה, מולקולות גדולות של חומרים מסוימים משחררות רק כמה תרכובות פשוטות, לפעמים אפילו אחת. וכך, בתאית או בעמילן נמצא רק גלוקוזה, ובגומי איזופרן. מאז ברזליוס שימש המונח 'פולימר' לתיאורה של הארכיטקטורה הגדולה, המבנה הכימי הגדול, והמונח 'מונומר' לתיאורה של התתייחידה הבסיסית. גראה היה שהתתייחידות האלה מחוברות מקצה לקצה ליצירת שרשרת. אולם דמיות ההרכב לא ביטלה את האפשרות של רבגוניות המבנה. אם כי שניהם נוצרים מגלוקוזה, לעמילן ולתאית יש בכל זאת תכונות שונות לגמרי: עמילן משמש מזון לבני־אדם, ותאית – לא. רק הסידור של התתייחידות יכול להסביר את ההבדל הזה. למעשה, בכמה פולימרים מסוימים, התתייחידות מסודרות באותו כיוון בשרשרת מונוטונית; לעומת זאת, בפולימרים אחרים הן פונות לפעמים בכיוון אחד ולפעמים בכיוון אחר בדגמים חלופיים. יש שרשרות ארוכות ויש קצרות. יש ליניאריות ויש מסועפות. בפולימרים מסוימים מוצאים רק סוג אחד של מונומר, ואילו באתרים כמה סוגים. בקיצור, ליצירת רבגוניות די בווריאציות של פרמטרים מעטים בלבד.

בתחילת המאה ה-20 ניסו הכימאים לחקור במעבדה את האמצעים שהטבע משתמש בהם לבניית הארכיטקטורות העצומות האלה. הכימיה של הפולימרים שונה מהכימיה של התרכובות הקטנות ומבוססת על עקרונות שונים. כדי להכין מולקולה אורגנית קטנה, הכימאי צריך להתערב בכל שלב ולמקם כל אטום במקום הרצוי, לעתים במחיר גבוה למדי. יצירת פולימרים, לעומת זאת, רק דורשת שהתתייחידות הבסיסיות יעורבבו במנות מסוימות וייחשפו לתנאים מתאימים של חומציות, חום, לחץ, וכן הלאה. מרגע שאותחלה הריאקציה, היא ממשיכה באופן ספונטני ללא התערבות נוספת של הכימאי. אולם הוא יכול להשפיע על טבעו של התוצר

הסופי בכמה דרכים: על-ידי גיוון תנאיה של הריאקציה, על-ידי שינוי התתייחדות הבסיסיות, על-ידי שינוי המנות שלהן, ובמיוחד על-ידי הוספה של חומרים מסוימים לתערובת, הפועלים כזרזים ומנחים בדרך כלשהי את הכיוון של התתייחדות לאורך השרשרת. השימוש בזרזים מאפשר לכוון את הריאקציה ולשלוט בארגון המרחבי של התוצר. כל זה הוביל לשיתוף-פעולה הדוק בין המדע לתעשייה. סדרה שלמה של חומרים חדשים נוצרו על-ידי הפילמור של מולקולות פשוטות, במיוחד פחמימות. אולם הופיעה גם סדרה שלמה של מושגים וטכניקות חדשניים, שהשפיעו בהדרגה על גישתה של הביולוגיה למקורומולקולות של יצורים חיים.

וכך, טכנולוגיית הפולימרים אימצה את שיטות האנליזה שהפיסיקה והכימיה הגדירו בהדרגה. עצם טבען של המקורומולקולות מעניק להן תכונות מיוחדות של משקל, מטען חשמלי, השתברות אור, וצמיגות. אופיינים אלה נותנים את האמצעים לטפל בתרכובות כאלו וללמוד את התנהגותן. אפשר לשקול אותן כביכול, בכך שמפעילים עליהן כוח צנטריפוגלי הגדול מאות אלפי מונים מכוח הכבידה. אפשר למדוד את המוביליות שלהן בשדה חשמלי, לאמוד את גודלן, נפחן וצורתן הכללית. בקיצור, אפשר לקבל תמונה כללית של הארכיטקטורות המולקולריות בשלמותן. אולם, בעיקרו של דבר, השימוש בשלוש טכניקות הוא אשר הבהיר את הרכבן המפורט של המולקולות האלה, את ארגונן הפנימי ואת תהליכי הסינתזה שלהן.

הטכניקה הראשונה היא מתחום הכימיה. בתחילת המאה ה-20 מצאו בוטנאים דרך לנקות ולבודד פיגמנטים צמחיים שונים. הם שפכו תמציות צמחים מקצה אל קצה של עמודות ארוכות של אבקת סידן פחמתי, ואחר-כך שטפו את העמודות בממיסים שונים. מאחר שגשארו באזורים שונים של העמודות, הפיגמנטים נפרדו זה מזה במהלך השטיפה. את השיטה הזאת, המוכרת בשם 'כרומטוגרפיה', אימצו הכימאים באמצע המאה הנוכחית, הרחיבו וגיוונו אותה. היא מאפשרת וריאציות רבות לאין ספור: אפשר לשנות את הרכב העמודה, את הממיסים המשמשים לשטיפה, את

פעילות היונים וריכוזם, וכן הלאה. לטכניקה זו יש כושר הפרדה גבוה. היא מבחינה בין תרכובות דומות מאוד, השונות זו מזו רק בפרטי מטען חשמלי, גודל וצורה. במקום בעמודות אפשר להשתמש גם בגליונות של גייר-סינון מיוחד, שעליהם מריצים את החומרים המיועדים לבדיקה, תחילה בכיוון אחד ואחר-כך באחר. מאחר שכל תרכובת נעה במהירות המיוחדת לה, הכימאי יכול להבחין בקלות, איכותית וכמותית, בין תרכובות כמעט זהות. לא נגזים אם נאמר, שפשטותה ויעילותה של הטכניקה הזאת שינו לגמרי את חקירת המקרומולקולות הביולוגיות, במיוחד חלבונים וחומצות-גרעין. לפני-כן היה ידוע, שתרכובות אלו מורכבות מכמה תתי-יחידות כימיות – כעשרים חומצות אמינו של חלבונים וארבעה בסיסים פוריניים ופירימידיניים של חומצות-גרעין – המקובצות במספרים גדולים מאוד בכל מולקולה. במאמץ ניכר אף אפשר היה לערוך הידרוליזה למולקולה, להגדיר את טבע מרכיביה ולמנות את מספר העותקים של כל תתי-יחידה. אולם לא היתה כל דרך לחקור כיצד התתי-יחידות מסודרות ומהו ארגונו המרחבי של החלבון. בזכות הכרומטוגרפיה התאפשר המחקר הזה. על-ידי שימוש באנזימים מסוימים יש בידי הכימאי האמצעים לחתוך מולקולה של חלבון ולאסוף לא את התתי-יחידות הבסיסיות הנפרדות, אלא מיקטעים הנוצרים מכמה תתי-יחידות. ואז הוא יכול לחתוך כל מיקטע לחתיכות קטנות יותר ולחקור את הרכבה של כל אחת מהן. כמו בהרכבת תצריף, צריך איפוא לסמן את מיקומם היחסי של המיקטעים והחתיכות, ולאחר מכן להתאים אותם זה לזה וליצור את התמונה המקורית. מאחר שיש אנזימים יחודיים, החותכים את המולקולה בנקודות שונות, ניתן לחתוך את אותה דוגמה לכמה תצריפים שונים. אם מתקדמים צעד אחר צעד אפשר לקבל כמה משוואות, כדי לפתור את כל הנעלמים. להפתעת הכול התברר, שניתן לצמצם את הארכיטקטורה התלת-ממדית המורכבת והמיוחדת במינה של מולקולת החלבון למבנה פשוט מאוד בעל מימד אחד. למעשה, זהו פולימר ליניארי הנוצר מחיבורן, קצה-אל-קצה, של כמה מאות תתי-יחידות, עשרים חומצות האמינו. המורכבות התלת-ממדית נובעת מהתקפלותה של השרשרת על-פני עצמה, מהפיתולים המעניקים לשטח-הפנים קרמיתאר בלתי-סדיר. מה שקובע את צורתה היחודית של המולקולה הוא

אורכה של השרשרת – ממאה תתייחידות ועד אלף תתייחידות – והרצף שלפיו מסודרות התתייחידות האלה. שוב מתברר, שרבגוניות ומורכבות נובעות מהפשטות של מערכת-מצורפת.

הטכניקה השנייה ששינתה את אפשרויות האנליזה הביוכימית היתה גילויים של הרדיואיזוטופים על-ידי הפיסיקאים. יסוד רדיואקטיבי פולט קרינות שניתן להבחין בהן. לכן הוא 'גראה' בכל מקום שהוא מופיע באורגניזם. על-ידי סינתזה יכול הכימאי למקם אטום רדיואקטיבי בנקודה שנבחרה במולקולה אורגנית או אי-אורגנית. מרגע שהוכנסה לאורגניזם, באופן זה או אחר, אפשר לעקוב אחרי מולקולה כזאת. אפשר לצפות בתמורות הרצופות שלה, בהשתברותה בין רכיבי האורגניזם, בהשתמרותה בו או בהיפלטותה ממנו. השימוש באיזוטופים גם איפשר להתיר את סבך המסלולים המטבוליים, לעקוב צעד אחר צעד אחר התפתחותן של המולקולות הקטנות והפילמור שלהן למולקולות גדולות, למדוד את יציבותם של רכיבים כימיים או את קצב התחדשותם. כשהיא באה יחד עם בדיקה היסטולוגית, האוטורדיוגרפיה של רדיואיזוטופים אף משמשת אמצעי לגילוי הרכב המבנים הנראים בתא תחת מיקרוסקופ האור, ולהתבוננות בשינויים המתחוללים בהם במהלך מחזור התחלקות התא. מעתה, לא רק הרכבם של היצורים החיים היה מושא האנליזה, אלא כל הדינמיקה של התמורות הכימיות שלהם.

לבסוף, הטכניקה השלישית שאיפשרה לגשת אל המבנה של המקורומוולקולות שבתוך התא מקורה בשכלולים שהכניסו הפיסיקאים באמצעי התצפית. ראשית, המצאת המיקרוסקופ האלקטרוני, שבו קרן אלקטרונים, שהחליפה את האור הנראה, מגדילה את כושר ההפרדה ביותר מאלף מונים מכושר ההפרדה של העין: כך התאפשר לצפות באברוני התא, לפרטי פרטיהם, ואפילו להבחין, בין שאר המולקולות, בצורתן של מולקולות מסוימות, גדולות מאוד. שנית, ובעיקר, באנליזה של גבישים בהשתברות קרני X: נוסף לצורה הכללית של מולקולה, ניתן היה לראות את מיקומו המדויק של כל אטום, לא רק בתרכובות פשוטות, אלא אפילו בארכיטקטורות המורכבות ביותר. אולם השגת התוצאות

המדויקות האלה היתה כרוכה בשימוש בטכניקה מסובכת מאוד. מאחר שהיתה בתחום עיסוקם של הפיסיקאים, היא עוררה אצל כמה מביניהם עניין בביולוגיה עצמה. בראשית המאה ה-20 השתמשו באנגליה בשיטת השתברות קרני X באנליזה של ארגון הגבישים הפשוטים, למשל, נתרן כלורי (מלח בישול). ממחקר זה נולדה אסכולה של קריסטלוגרפים, שהתעניינו בפענוח המבנה הפנימי של תרכובות מסוגים שונים; גם של מקרומולקולות ביולוגיות – עד כדי כך היו הפיסיקאים מאסכולה זו משוכנעים, שתפקודו של התא החי חייבים להיות מבוססים על הקונפיגורציה של המולקולות האלה. למעשה, אחד מהם הוא שהציע את השם 'ביולוגיה מולקולרית' לתיאור סוג זה של אנליזה. ואז, כל מומחה שעבודתו היתה קשורה בדרך כלשהי עם ניסויים בתא, מצא עצמו במצבו של מסיה ז'ורדן: עוסק בביולוגיה מולקולרית מבלי לדעת זאת. תחילה, בהיותם מבודדים במידת־מה, גיששו הקריסטלוגרפים את דרכם בסבך המערכות הביולוגיות. הם היו צריכים להתקדם שלב אחר שלב, מהפשוט אל המורכב, מגדילים בהדרגה את כושר ההפרדה, לומדים להכיר אזורים מועדפים מסוימים במולקולות ומסמנים אותם באטומים כבדים, שקל לגלותם בעזרת קרני X. אט־אט החלו מבחינים בקווי־המיתאר של המקרומולקולות ואף להגדיר את פרטיהן. ואז החליף את האנליזה הקריסטלוגרפית הטהורה משחק מורכב, המצריך פרשנות של הנתונים הפיסיקליים, עם בניה של דגמים במעבדה, וסוג של אינטואיציה, המבוססת על ידיעת התכונות של האטומים ושל הקשרים ביניהם. למרות הקושי הרב שניצב לפניו, הסתבר שהדו־שיח הטרי הזה בין הקריסטלוגרפיה לכימיה התיאורטית הוא הדרך היחידה לחקור את הארגון של הארכיטקטורות הביולוגיות הגדולות. כי אף־על־פי שאנליזה כימית מתארת את הסדר של התתי־יחידות לאורך השרשרת, אין היא מספקת כל מידע על קיפוליה של השרשרת, על פרטי האנטומיה של המולקולה או על הקונפיגורציה שלה במרחב. האנליזה הפיסיקלית מאפשרת למקם כל פרט במולקולה, המכילה כמה אלפי אטומים.

לקריסטלוגרפים הצטרפה קבוצה אחרת של פיסיקאים, שגם הם

התעניינו בביולוגיה, אבל מסיבות אחרות. לאחר מלחמת העולם השנייה, פיסיקאים צעירים רבים היו המומים מהשימוש הצבאי שנעשה באנרגיה אטומית. יתרה מזו, חלקם לא היו מרוצים מהכיוון שאליו הופנו הניסויים בפיסיקה גרעינית, מאיטיות הניסויים ומן המורכבות של השימוש במכשירים גדולים. כל אלה בישרו בעיניהם את קיצו של המדע, והם חיפשו סביבם תחומי פעילות אחרים. כמה מהם פנו לביולוגיה ברגשות מעורבים של דאגה ותקווה: דאגה, מאחר שכל ידיעותיהם על היצורים החיים הסתכמו בזכרונות עמומים משיעורי זואולוגיה ובוטניקה בבית-הספר התיכון; ותקווה, משום שכמה מטובי החוקרים הבכירים בשטחם הצביעו על הביולוגיה כעל מדע מבטיח מאוד. גילס בוהר סבר, שמדע זה יכול לשמש מקור לחוקי פיסיקה חדשים, המחכים לגילויים. גם שרדינגר ניבא תקופה חדשה ומרגשת לביולוגיה, במיוחד בשטח התורשה. די היה לשמוע את אחד החוקרים המובילים במכניקת הקוואנטים שואל מה הם חיים? ולאחר מכן מתאר תורשה במונחים של מבנים מולקולריים, קשרים בין-אטומיים ויציבות תרמודינמית, כדי להצית את התלהבותם של כמה פיסיקאים צעירים ולהעניק הכשרמה לביולוגיה. השאיפה וההתעניינות שלהם היו ממוקדים בבעיה אחת ותו לא: טבעו הפיסיקלי של המידע הגנטי.

מיקרואורגניזמים

במחצית המאה ה-20 השתנו לא רק המושגים והטכניקות אלא גם המושאים שהשתמשו בהם הביולוגים בחקר התא והתורשה. הגנטיקה הקלאסית לא יכלה לגשר על הפער שבין הגן לתכונה האופיינית. היא הגיעה למסקנה שהכרומוזומים מכילים חומר היכול גם להתרבות במדויק וגם לשאת יחודיות גנטית. אך המושאים הביולוגיים שנעשה בהם שימוש בחלקה הראשון של המאה ה-20 לא התאימו לחיפוש אחר חומר מעין זה וגם לא לניתוח אופן פעולתו. המאמצים המשולבים של הפיסיולוגים והגנטיקאים בחקר הדרוזופילה הצליחו להראות את השפעתם של גנים על ריאקציות כימיות מסוימות באורגניזם. אולם ביצור מורכב,

המתרבה בדרך מינית, השפעתו של גן מתבטאת בדרך-כלל רק לאחר זמן רב, אחרי סדרה של טרנספורמציות הנאכפות על-ידי ההתפתחות והמורפוגנזה. האורגניזמים שנחקרו על-ידי הגנטיקאים לא התאימו לכימאים, ולהיפך. כדי ששילוב מאמציהם יוכתר בהצלחה, נדרש מושא ניסויי משותף. לבסוף, בניגוד לכל הציפיות, המיקרואורגניזמים הם שהיו למושאי המחקר, במיוחד חיידקים ווירוסים.

הבקטריולוגיה אמנם נולדה לפני כשלוש מאות שנה, עם המצאת המיקרוסקופ, אך זמן רב עסקה אך ורק בתצפית, עד שבזכות עבודתו של פסטר הפכה למדע ניסויי. בתוך שנים מעטות הופתע האדם לגלות, שהעולם לא יכול היה להיות מה שהוא ללא מיקרואורגניזמים. אולם חשיבותם של המיקרובים כ'גורמים' פתוגניים, תיפקודם במחזורי החומר בביוספירה, תפקידם בתעשיות רבות, האפילו זמן רב על ערכם בחקר המנגוונים הביולוגיים. תיאוריית התא תרמה להאחדת עולם החי; אולם חיידקים נשארו מחוץ לעולם התא. למעשה, זעירותם מנעה את הכרת מבניהם האופייניים. כמעט לא היה אפשר לעשות דבר חוץ מאשר להכין תרביות שלהם, לתארם, ולנסות לסווגם. רק בראשית המאה ה-20 הפכו המיקרובים בהדרגה למושאי החקירה של הפיסיקה והביוכימיה. ההתפתחות של הרפואה ושל התעשיות השונות תבעו זיהוי מדויק של הגיפים וידיעת תכונותיהם. ככל שגדל מספר המיקרובים שבודדו, כן חשוב היה להגדיר את תכונותיהם האופייניות ולהבחין ביניהם. המיקרובולוגים אמנם הגבילו את עצמם לחקר הגדילה בתנאים שונים, אך בכל זאת הצליחו להגדיר את הדרישות התזונתיות של המיקרואורגניזמים, את יכולתם להשתמש בתרכובות מסוימות כבמקור פתמן, ואת רגישותם להשפעה של 'גורמים' אנטי-מיקרוביים. בו-בזמן גילו הכימאים שמיקרואורגניזמים מתאימים במיוחד למחקריהם. מאחר שהיה פשוט וקל יותר לעבוד עמם ולהרבותם מאשר שריר של יונה או כבד של חולדה – תרבות של שמרים או של חיידקים התאימה בדיוק למיצוי הרכיבים, לחקר חילוף-החומרים ולקביעת הפעילויות האנזימטיות. יונים, חולדות או חיידקים, לכל מושאי המחקר האלה היו, באורח מפתיע, תכונות דומות: אותן ריאקציות

מטבוליט חיוני; כל אחת פוגמת באיכותו של אנזים המעורב בסירתו זו. כל הכימיה של האורגניזם מנוטרת איפוא על-ידי התורשה שלו. גן מסוים מפקח על ריאקציה כימית מסוימת, מפני שהוא קובע את תכונותיו של חלבון-אנזים מסוים המזרוז את הריאקציה. וכך נמצא חלבון בפער שנצפה קודם לכן בין הגן לתכונה האופיינית.

משעה שהריאקציות של חילוף-החומרים נעשו בדרך זו מושאי המחקר הגנטי, אפשר היה לנתח את התורשה של אורגניזמים פשוטים כחיידקים. אותן תכונות ממש, שבגללן הושארו החיידקים מחוץ לגנטיקה, הן שעשו אותם עכשיו מושא מתאים במיוחד בחקר הווריאציות. מאחר שגודלם זעיר וגדילתם מהירה, חיידקים יוצרים בתוך שעות ספורות אוכלוסיות עצומות בנפחים קטנים מאוד. בניתוח תרביות בשיטות סטטיסטיות, נמצא שהווריאציות היא תוצאה של שינויים קוואנטיים נדירים, הזהים למוטציות ביצורים עילאיים. כמו לזוב, גם לחיידקים יש איפוא גורמים-קובעים תורשתיים, כלומר, גנים. הגנים שולטים במורפולוגיה כמו גם בחילוף-החומרים, וגם בכל התכונות המובחנות. במיקרובים מסוימים אף נמצאו תופעות של הזדווגות, המזכירות מיניות באורגניזמים עילאיים, עם חיידקים זכריים ונקביים. מעתה התאפשר לייצר בני-כלאיים ולהגדיר את היחסים בין הגנים. התברר שהגנים מסודרים לאורך מבנים ליניאריים, בדומה לכרומוזומים ביצורים עילאיים. דבר דומה נמצא בוורוסים. בכל עולם-החי יש איפוא רק דרך אחת להבטיח את קביעות הצורות והתכונות במשך הדורות. גם יש רק דרך אחת לשנותן. כללי המשחק הגנטי הם אותם כללים בכל עולם-החי.

בעבר, הרבייה המינית היתה כמדומה האמצעי היחיד בסידורם של הגנים של מין בצירופים שמספרם גדול דיו כדי לאפשר מיגוון כמעט אינסופי של פרטים-יחידים. אולם בחיידקים יש אמצעים אחרים מלבד מיניות להעברת חומר גנטי מתא אחד למשנהו. וכך וירוסים יכולים לשמש כלי-תעבורה לגנים חיידקיים וליצור מעין תורשה מידבקת. במינים מסוימים, גם החיידקים יכולים לספוח ולשלב בכרומוזומים שלהם עצמם את הגנים שהשתחררו בעקבות

הריסתם של חיידקים אחרים. אם כן, היה זה משגה לקבוע זיקה בין תורשה לרבייה מינית. צריך היה להרחיב את רעיון התורשה. מעתה היא היתה ליכולת ליצור את הזוהה, יכולת שכל תא ניחן בה והיא מועברת במשך הדורות. העיקרון המרכזי של התורשה הוא תכונה זו לייצר מחדש מבנים וריאקציות באמצעות הכפלה. שום אורגניזם חי איננו יכול להתקיים בלעדיה. כל השאר – מיניות, רבגוניות הצורות והתמיינות התאים – הם רק סיבוכים שהתפתחו במהלך האבולוציה, רק וריאציות על אותו נושא בסיסי. אין שום קושי להעלות על הדעת יקום משעמם למדי, ללא מיניות, ללא הורמונים וללא מערכת עצבים; יקום המאוכלס רק על-ידי תאים זהים המתרבים עד אין-סוף. למעשה, יקום זה קיים. זהו היקום שיוצרת תרבות של חיידקים.

לשימוש בתרבויות של חיידקים כמושא המחקר היו שתי תוצאות חשובות. ראשית, הוא נתן גישה למבנה העדין של הגנים. למעשה, הניתוח הגנטי של חיידקים היה פשוט עד לקיצוניות והשיג מידת הבחנה גדולה יותר שלא היתה מצויה בחקר האורגניזמים המורכבים. די היה במריחה של כמה טיפות תרבית על פני מצעים נבחרים, ובתוך שעות ספורות התקבל מידע על מיליארדי אירועים, מוטציות ורקומבינציות. קשה להעלות על הדעת כמה עבודה היתה נדרשת להשגת תוצאה דומה בחקירת בעלי-חיים או צמחים. הגדלה זו בכושר-ההפרדה הובילה לשינוי בייצוגו של הגן כמבנה משולב, חרוז אחד במחרוזת, כפי שהיה מקובל על הגנטיקה הקלאסית. אם כי הוגדר כיחידת תיפקוד, הגן מכיל למעשה כמה מאות יסודות שמוטציה יכולה לשנותם ורקומבינציה להפריד ביניהם. אולם העקרונות הישנים עדיין היו ישימים בארגון חדש זה: הטבע הקוואנטי של הווריאציות, תפקיד האקראיות בסידורים לפי חוקי ההסתברות, היערכות היסודות לאורך מבנה חד-ממדי. יתרה מזו, חיידקים סיפקו את האמצעי לגשת אל הכימיה של החומר הגנטי. אם גנים המשתחררים בשעת הריסתם של חיידקים מסוימים אכן יכולים לחדור לחיידקים אחרים, להשתרש בהם ולהעניק להם תכונות אופייניות חדשות, אזי הכימאי יכול להתערב. הוא יכול למצות את הגנים האלה, למדוד ולנקות אותם כמו כל תרכובת אחרת. בדרך זו מצא אברי, שהפעילות הגנטית

קשורה לנוכחותה של חומצה דאוקסיריבונוקליאית (DNA). כמאה שנה היתה ידועה נוכחותו של חומר זה בגרעין התא; ההרכב הכימי הכללי שלו היה ידוע. אולם עד אז לא ידעו איזה תפקיד יש לייחס לו ואיזה מבנה מולקולרי להקצות לו. מסתבר שתפקידו הוא לשאת את היחודיות של יחידות מנדל. ואת מבנהו אפשר היה לקבוע בפעולה משולבת של אנליזה כימית וקריסטלוגרפיה. זהו פולימר ארוך, הנוצר על-ידי הסתדרותן של ארבע תתי-יחידות, ארבעת הבסיסים האורגניים, החוזרות מיליוני פעם ומתחלפות לאורך השרשרת, כמו אותיות של אל"ף-בי"ת לאורך טקסט כתוב. הסדר של ארבע התתי-יחידות האלה הוא זה המכוון את הסדר של עשרים התתי-יחידות בחלבונים. לפיכך הכול מוביל אותנו לדאות ברצף המצוי בחומר הגנטי סדרה של הוראות, המפרטות את הארכיטקטורות המולקולריות, ובכך את תכונות התא; לבחון את התוכנית של האורגניזם כמסר המועבר מדור לדור; לראות את המערכת-המצורפת של ארבעת הרדיקלים הכימיים כמערכת של מספור על בסיס ארבע. בקיצור, הכול מזמין אותנו להשוות את הלוגיקה של התורשה ללוגיקה של מחשב. ראוי להעיר, כי רק לעתים רחוקות אפשר לסמוך במידה כה רבה על מודל שהציעה תקופה מסוימת.

לשימוש בתרבויות של חיידקים בתחומי מדע שונים היתה תוצאה נוספת: מאחר שמדובר באורגניזם כה פשוט, אפשר היה לפשט טכניקות שונות עד לנקודה שבה אפשר היה ליישמן בו-בזמן. כדי לחקור את התורשה, לא די היה לצפות בתכונות האופייניות של תא החיידק, בווריאציות שלהן ובהסתדרותן-מחדש בבני-הכלאיים. במקביל, היה צריך למצות את החומר הגנטי, להגדיר את האופייניים שלו ולמדוד את תכונותיו בצנטריפוגה. בו-בזמן גם צריך היה לערוך אנליזה לחלבונים המתאימים, להגדיר את מבניהם ולהעריך את פעילותם האנזימטית. באותה דרך התאפשר לעקוב אחר התוצאים של מוטציה, לא רק בעזרת השינויים בתיפקוד שהיא גורמת להם, אלא גם בעזרת השינויים במבנים שמדובר בהם. ולהיפך, התאפשר לנתח את תכונותיו, ארגונו ותיפקודיותו של תא לפי טבע הגריעות שמוטציות גורמות. מעתה כבר לא שאף הניתוח הגנטי אך ורק לפרק את מנגנון התורשה: הוא הפך לכלי מדויק לציון רכיבי התא,

תפקידם ופעולות־הגומלין שלהם עם הרכיבים האחרים. נעשה שימוש במוטציות לחיתוך התא מבלי להרוס אותו. כבר למעלה ממאה שנה גותן חקר הפתולוגיה בידינו את אחת השיטות הבטוחות ביותר לפרש את המצב הנורמלי. התערבות הפיסיולוגיה הניסויית באורגניזם נעשית מן החוץ: היא גורמת בו גריעות באמצעים מכניים או על־ידי התוצא של חומרים רעילים. הביולוגיה המולקולרית גורמת גריעות בפנימו של האורגניזם כתוצאה של מוטציות. היא רוצה להשפיע לא על המבנים שכבר נוצרו, אלא על התכונה המכוונת את יצירתם. הלחץ הבריני המופעל על אוכלוסיה של חיידקים במעבדה יכול להיות כה גדול, עד שאפשר לקבל, כמעט לפי רצונו, מפלצות, שבהן התיפקוד הנבחר נפגע על־ידי מוטציה. באמצעות מפלצות מעין אלו יכולים לנתח אי־נורמליות: הפיסיולוגים והמורפולוגים באורגניזם השלם, הביוכימאים והפיסיקאים בתמציות אל־תאיות. מכאן ואילך כבר אין בביולוגיה שני תחומים המתעלמים זה מזה, אלא שני היבטים של אותו ניתוח.

שינויים מפליגים התחוללו איפוא בעמדתה של הביולוגיה. כל ההיסטוריה שלה נשלטה על־ידי העימות בין שתי גישות מנוגדות: בין התקווה להסביר את ביצועיהם של אורגניזמים לפי תכונותיו של מושא החקירה, ובין הסירוב לקבל את התפישה הטוענת כי לשילוב של היצורים החיים אין שום תכונה מיוחדת. מצד אחד, ככל שהתקדמה האנליזה הכימית, כן הובהר שקיימת זהות בין החוקים השולטים בעולם־החי ובעולם־הדומם. מצד אחר, ככל שהתרחב חקר ההתנהגות והאבולוציה של אורגניזמים חיים, כן התברר שיש פערים בין שני העולמות האלה בכל רמה של שילוב. מווירוס לאדם, מתא למין, הביולוגיה מתעניינת במערכות שמורכבותן גדלה בהתמדה על־ידי שילוב הולך וגדל של מערכות מרמה נמוכה יותר. כל רמת ארגון מייצגת סף, שבו משתנים בבת־אחת מושאי התצפית, שיטותיה ותנאיה. תופעות שניתן לזהותן ברמה אחת נעלמות ברמה נמוכה ממנה; ושם גם הפירוש שלהן כבר איננו תקף כמו ברמה הגבוהה יותר.

הביולוגיה צריכה היתה איפוא לבטא את הרמות האלה שתיים שתיים, לחצות כל סף ולגלות את הדברים המיוחדים את השילוב

והלוגיקה שלו. החיידקים מהווים מינימום ויטלי כביכול. בהתעלמה מכל האורגניזמים האחרים, הביולוגיה המולקולרית החלה ברמת השילוב הנמוכה ביותר, וזיהתה אורגניזם עם חיידקים. היא התמקמה במתכוון באחד מגבולותיו של עולם־החי, בגבולו עם הדומם. הרמה שמתחת מתוארת במונחים של כימיה ופיסיקה, הרמה שמעל במונחים של ארגון, של מערכת לוגית, אפילו של מכונה אוטומטית. אולם טבע המערכת ושיטות התצפית מאפשרים תמיד לבחון את שתי הרמות גם יחד, להשוות בהתמדה את האורגניזם השלם עם פרטיהם של רכיבים או תופעות המתגלים באנליזה. הידע שלנו על תא החיידק הלך והתבהר עם הצטברותן של טכניקות שונות, שיושמו על האורגניזם בשלמותו, או על תמציות; במיוחד, בזכות שיתוף־הפעולה בין הניתוח הגנטי והאנליזה הפיסיקלית והכימית בכל שלב ושלב. צריך להרוס את שלמותו של התא כדי להכיר את רכיביו ולחקור את תיפקודיהם. אולם צריך להשתמש בתא בשלמותו כדי לאמת, שלאחר הפרדה וניקוי, תרכובות מבודדות אמנם פועלות במבחנה כפי שהן פועלות באורגניזם. מן ההשוואה בין שתי הרמות האלה החל מופיע התיאור של תא החיידק.

המקור

בחקר חיידקים, פרטי־יחיד משמש רק לעתים רחוקות מושא הניתוח. בניסוי כרוכה בדרך־כלל תרבית, כלומר, מצע שבכמה סנטימטרים מעוקבים שלו נמצאת אוכלוסיה המונה כמה ביליוני מיקרובים. אין איפוא שום סיכוי שאפשר יהיה לצפות ישירות בתכונות של כל פרטי־יחיד. אפילו כדי לגלות את נוכחותם של פרטים־יחידים מסוימים, של מוטנטים למשל, צריך להעמיד אוכלוסיה בתנאים שבהם יתרבו רק אותם פרטים־יחידים המעניינים אותנו. גם במקרה כזה, איננו צופים בפרטים־היחידים עצמם, אלא בצאצאיהם – שוב אוכלוסיה עצומה. לפיכך, הייצוג של תא החיידק בעיני הביולוג יכול להיות אך ורק סטטיסטי. מדובר במין דיוקן־רזובוט, המתקבל ממספר רב של תצפיות שנאספו ממסה של פרטים־יחידים.

דיוקן־רובוט זה מייצג את המושא הפשוט ביותר שיש בו תכונות של ארגון, אוטונומיה ואי־השתנות, הנחשבים בדרך־כלל לאופייניים של יצורים חיים. מובן שיש בנמצא ארגונים פשוטים יותר, כמו וירוסים. אולם, אף־על־פי שווירוסים ניתנים בתכונות מסוימות של אורגניזמים, אין הם ניתנים כלל בכלן. משום כך אין הם אוטונומיים ודבר זה מונע אותם מלהיחשב ליצורים חיים. ואילו תאיהם של האורגניזמים העילאיים יותר, או האורגניזמים החד־תאיים, כמו פרוטוזואה ושמרים, ארגונים מורכב הרבה יותר מזה של החיידקים.

הפשטות היחסית של תא החיידק אין משמעה שתכונות האופיינית היא פרימיטיבית מנקודת־המבט האבולוציונית. אין להתפתות ולקשור פשטות עם ארכאיות ולראות את תא החיידק כמאובן חי, או אפילו כאבינו הקדמון המשותף. אין זה משנה אם מדובר בחיידק או ביונק, כל יצור חי שהביוולוג יכול לבדוק היום הוא תוצאה של מיליארדי שנות אבולוציה. מאחר שנתיבי התקדמותה של האבולוציה לא השאירו ציוני־דרך נראים, קרוב לוודאי שעיקוליהם ופיתוליהם של נתיבים אלה יישארו עלומים לנצח. דבר איננו מאפשר לנו למדוד את הקירבה בין אורגניזמים פרימיטיביים ובין חיידקים בגי־הזמן. אפשר רק לדמיון מה היה החומר המקורי שהאבולוציה השתמשה בו. גם אם היה קו־דמיון כלשהו בינו לבין תא החיידק בימינו, אין אנו יכולים לדמיינו כבעל מורכבות כה רבה כמוהו. מאחרי כל חיידק שאנו בוחנים, מאחרי כל רכיב שלו, יש היסטוריה כה ארוכה, שמוכרחים להבין מערכת ממש כמו שצריך לדעת את המבנה שלה.

מסיבות טכניות, חקר תא החיידק התרכז בחיידק הבלתי־מזיק אשריכיה קולי (*Escherichia coli*), אורגניזם הנמצא בדרך־כלל במעי של האדם. הוא מתרבה יפה מאוד במצע המורכב מכמה מלחים מינרליים פשוטים ומתרכובת אורגנית, סוכר למשל, המשמש לו מקור פחמן ואנרגיה גם יחד; אין במצע זה שום דבר שהכימאי איננו יכול ליצור מיסודות פשוטים. אפשר לגדל את החיידק אשריכיה קולי גם במצע מורכב יותר, כמו מרק בשר, המכיל תוצרים אורגניים שונים. נוכחותן של תרכובות אורגניות אלו, הנחוצות לגדילה,

מאפשרת לתא החיידק לדלג על כמה סינתזות וכך להיכפל מהר יותר. בתנאים מיטביים של טמפרטורה ואיזורור, חיידק זה מצליח להיכפל כל עשרים דקות. הוא גדל ומתארך במשך עשרים דקות, ואז הוא מתחלק לשניים, וכך נוצרים שני חיידקים זהים זה לזה ולחיידק המקורי.

חיידק הוא אובייקט קטן מכדי שייראה בעין בלתי־מזוינת. במיקרוסקופ האור נראה אשריכיה קולי כצורה מוארכת, כמיקרון (אלפית מילימטר) אורכה וכחצי מיקרון רוחבה; אך אי־אפשר להבחין בשום מבנה פנימי בתוכה. במיקרוסקופ האלקטרוני, צילומי החתכים של הבצילים, שעברו קיבוע וצביעה, נראים כמו נוף הירח. רק בהתמדה והשוואה, ושימוש בטכניקות מגוונות ביותר, הצליחו לזהות את המבנים הנראים הנדירים. בצילומי המיקרוסקופ האלקטרוני, תא החיידק נראה כשק קטן, השומר על צורתו באמצעות דופן קשיחה. מתחת לדופן, השק מוקף בקרום דו־שכבתי, המפריד פיסית בין התא למצע. בהיותו בלתי־חדיר לחומרים מסוימים, הקרום מגן על התא מפני איבוד המולקולות שאותן הוא עצמו מייצר, אך מאפשר זרימה חופשית של מלחים מינרליים מסוימים. זאת ועוד: באמצעות סוגים כלשהם של משאבות המצויות בקרום, תא החיידק גם יכול לספוח ולרכז תרכובות מסוימות, למשל סוכרים, שהוא מוצא במצע וזקוק להן בחילוף־החומרים שלו. בינתיים ידוע רק מעט על מבנה הקרום וכיצד פועל המנגנון של המשאבות האלה. אפילו דרך המיקרוסקופ האלקטרוני אפשר להבחין רק במספר קטן של מבנים מוגדרים בתוך השק. באיזור המרכזי נראית מסה צפופה למדי, העשויה סיבים המקופלים על עצמם ומצונפים: זהו הסיב הארוך המכיל את התוכנה הגנטית. נוסף על כך, נראה שהשק מכיל רק אלפי גרגרים קטנים עגולים, בני אותו גודל: כאן מסונתזים החלבונים.

כשהכימאי פותח את השק הוא מוצא כמה אלפי סוגים מולקולריים. אולם לפי גודלן, אין מולקולות אלה יוצרות סדרה רציפה. אפשר לסווג את המולקולות בשתי קטגוריות מוגדרות היטב. כמחציתן קטנות למדי, ומשקלן המולקולרי איננו עולה על 500 או 600. לעומת זאת, האחרות הן מולקולות גדולות מאוד, גדולות

מ-10,000 עד 20,000. אין גודל ביניים בין שני גדלים אלה. התפלגות זו, המתמיהה במבט ראשון, מוסברת על-ידי הדרך שבה יוצר התא את רכיביו. בניה של ארכיטקטורות מולקולריות עצומות, חלק אתר חלק, אטום אחר אטום, היא משימה מורכבת מאוד ומחירה רב, אפילו לתא. לפיכך, התא פועל בשני שלבים. ראשית, היסודות הנלקחים מהמצע מצורפים זה לזה בסדרה של התמרות. הם משתחלפים כל הזמן, אחד אחד או בקבוצות, מועברים ממקום למקום, מיתוספים או מוחסרים. צעד ראשון זה מורכב בעיקרו מקשירת אטומים של פחמן זה לזה. הוא מביא ליצירת השלדים של מבנים שונים, מוארכים או סגורים בטבעות, שעליהם מחוברים אחר-כך אטומים אחרים. בפעילות הזאת מעורבות מאות ריאקציות כימיות. אולם לבסוף היא יוצרת מספר מוגבל של תרכובות קטנות, כמה עשרות לכל היותר. בשלב שני של כימיית התא, המולקולות הקטנות מקובצות כדי ליצור את המולקולות הגדולות. הפילמור של תתי-יחידות, המונחות קצה לקצה, הוא היוצר את השרשרת האופיינית של המקרומולקולות. כל פעולה כימית דומה איפוא בדיוק לאחרות; היא כרוכה תמיד בהוספה של תתי-יחידה אחת לשרשרת ההולכת וגדלה. על-ידי שינוי באורך השרשרת, על-ידי סידור התתי-יחידות בסדר שונה, התא בונה כך מספר ניכר של ארכיטקטורות גדולות ממספר מוגבל של תתי-יחידות פשוטות. שני השלבים של כימיית התא שונים איפוא בתיפקודם, בתוצריהם ובטבעם. הראשון טובע את הדגמים הכימיים; השני מקבץ אותם. הראשון יוצר תרכובות המתקיימות רק באופן זמני, מאחר שהן שלבי ביניים בביסוינותזה; השני בונה תוצרים קבועים. הראשון פועל בשורה של ריאקציות השונות זו מזו; השני על-ידי חזרה על אותה ריאקציה.

סדרה של התמרות, שכרוכות בה תרכובות קטנות, גם משמשת את תא החיידק לשינוי האנרגיה שהוא מפיק מהמצע. בעולם החיידקים יש דרכים רבות להשיג אנרגיה: על-ידי קליטת אור השמש, על-ידי חימצון תרכובות אורגניות או אי-אורגניות. אולם כדי לצבור את מאגריו ולהעבירם, תא החיידק פועל שוב כמו כל היצורים החיים. תמיד מעורבת בדבר אותה תרכובת עתירת-זרחן: הסינתזה שלה מאפשרת לאחסן את האנרגיה הפרוטנציאלית;

ההידרוליזה שלה מאפשרת לשנע את האנרגיה בשעה שהיא נדרשת. החיידק שלנו, אשריכיה קולי, יכול להפיק את האנרגיה שלו רק עלידי פירוק של תרכובות אורגניות מסוימות, כמו סוכרים. במולקולת סוכר – גלוקוזה, למשל – האטומים מסודרים במבנה מוגדר היטב בהתאם לסדר מרחבי מדויק. עלידי הריסת המולקולה ופריעת המבנה שלה, תא החיידק הופך את הסדר המקורי של הגלוקוזה לאנרגיה כימית. ואז אנרגיה זו משמשת לסינתוז רכיבי החיידק – במלים אחרות, לכונן סדר מולקולרי שונה, זה של התא. לפיכך, בסופו של דבר, שינוע אנרגיה מתבטא בהעברה של ארגון, בהמרת הסדר של המצע לסדר של החיידק. כדי לפרק מולקולה של סוכר, התא פועל בשורה של ריאקציות, המתקיימות זו אחר זו. בשלב מסוים משתחרר קוואנט של אנרגיה אשר נקלט כמולקולה של תרכובת עתירת־זרחן זו. בזכות פירוק מבוקר זה, העברות האנרגיה בתא מתקיימות ביעילות גבוהה.

אם נידרש לאנלוגיה, ניטיב לתאר את תא החיידק בעזרת המודל של מפעל כימי מיניאטורי. מפעל וחיידק מתפקדים רק באמצעות אנרגיה המתקבלת מן החוץ. בשורה של פעולות, שניהם משנים את חומרי־הגלם, הנלקחים מן המצע, לתוצרים מוגמרים. שניהם מפרישים תוצרי פסולת אל סביבתם המיידית. אולם עצם רעיון המפעל מצביע על כוונה, כיוון, רצון לייצר – בקיצור, תכלית שלמען השגתה אירגנו את הארכיטקטורה ותיאמו את פעילויותיה. מהי אפוא תכליתו של החיידק? מה הוא רוצה לייצר כדי להצדיק את קיומו, לקבוע את ארגונו ולהימצא ביסוד עבודתו? לשאלה זו יש כנראה רק תשובה אחת. החיידק שואף בהתמדה ליצור שני חיידקים. דומה שזהו היעוד האחד שלו, השאיפה היחידה שלו. תא החיידק הקטן מבצע במהירות־שיא כאלפיים ריאקציות, שהן תילוף־החומרים שלו. הוא גדל. הוא מתארך בהדרגה. וכאשר מגיע הזמן, הוא מתחלק. במקום שהיה פרטי־יחיד אחד, יש לפתע שניים. ואז כל אחד משני הפרטים האלה נעשה המרכז של כל הריאקציות הכימיות. כל אחד מייצר את כל המבנים המולקולריים שלו. כל אחד גדל מחדש. כעבור דקות ספורות, כל אחד מתחלק בתורו ליצירת שני פרטים־יחידים. וכן הלאה, כל עוד מרשים זאת התנאים. במשך שני מיליארדי שנים או יותר, חיידקים – או משהו דומה להם –

הולכים ומתרבים. המבנה של תא החיידק, תיפקודיותו והכימיה שלו שופרו לתכלית אחת: ליצור שני עותקים של עצמו, טוב ככל האפשר, מהר ככל האפשר, ובתנאים שונים מאוד. אם נחשוב על תא החיידק כמפעל, הרי אין ספק שמדובר במפעל מסוג מיוחד במינו. התוצרים של הטכנולוגיה האנושית שונים לחלוטין מהמכונות היוצרות אותם, ולכן הם גם שונים לחלוטין מהמפעל עצמו. לעומת זאת, תא החיידק מייצר את רכיביו, וגם התוצר הסופי זהה לו עצמו. המפעל יוצר מוצר; התא יוצר־מחדש את עצמו.

שני סוגי הסינתזה המתבצעים על־ידי התא החי – על־ידי התמרות רציפות או על־ידי פילמור – אינם שונים עקרונית מאלה הנעשים על־ידי הכימאי האורגני במעבדה. אין שום מיסתורין מיוחד בתמורות המתרחשות בתא; אין שום חומרים בלתי־ידועים; גם אין שום ריאקציה, שום קשר כימי שהוא מעבר לתחום האפשרויות של הטכניקות המעבדתיות. הכימאי לא רק יכול להכין תרכובות רבות מאלה המצויות בתא; אלא כמה מהן אף נוצרות ספונטנית בתנאים שקרוב לוודאי התקיימו על־פני כדור־הארץ לפני הופעתם של היצורים החיים. זה קורה, למשל, כאשר תמיסות בעלות הרכב אי־אורגני מתאים 'מעוררות' על־ידי השתחררות של אנרגיה, למשל קרינה אולטרה־סגולה. אין שום אי־רציפות בין הכימיה של החי ובין הכימיה של החומר האינרטי – כשמדובר בחומרי הגלם, בטבען של הריאקציות או בטיפוס הקשרים הכימיים.

במעבדה ובתעשייה אמנם יכולים לייצר חלק מהתרכובות האופייניות לתא – אך באיזה מחיר עצום! המכשור יקר ומגושם; התפוקה מיזערית למדי; תנאי הטמפרטורה, הלחץ והחומציות כמעט תמיד אינם אלה המתאימים לחיים. ובאותו זמן מבצע תא החיידק שלנו כאלפיים ריאקציות שונות במימונות שאיננה בת־השוואה, ובמרחב קטנטן. אלפיים ריאקציות אלו מתבזרות ומתכנסות במהירות־שיא, מבלי שתסתבכנה אי־פעם זו בזו, והן מייצרות בדיוק את הכמות והאיכות של הסוגים המולקולריים הנחוצים לגדילה ולהתרבות, בתפוקה המתקרבת למאה אחוז. הכימיה של החי שונה מזו של המעבדה לא בטבעה של העבודה המתבצעת, אלא בתנאי המימוש שלה.

אולם זה מכבר יודעים הכימאים את סודו של התא: הלוא הוא השימוש באנזימים, חומרים המשפעלים ריאקציה מבלי לקחת בה חלק, או מבלי שיתחולל במהלכה שינוי כימי בהם עצמם. רוב הריאקציות הכימיות מתרחשות באופן ספונטני אך באיטיות רבה מאוד בתנאי מעבדה או בתא. האנזים רק מגביר את קצב הריאקציה. אך בעוד שאנזימים מעבדתיים הם בדרך-כלל בלתי-יחודיים, אלה שבאורגניזמים חיים הם יחודיים במפורש. לכל ריאקציה כימית בתא יש אנזים מסוים אחד, ורק אחד. כל אנזים משפעל את אחת מהריאקציות בתא, ורק אותה. כדי לבצע את אלפיים הפעולות הכימיות שלו, התא צריך איפוא ליצור אלפיים סוגים שונים של אנזימים. כל האנזימים שייכים לאותה משפחה מולקולרית – החלבונים. לא כל החלבונים הם אנזימים: כמה מהם ממלאים תפקיד אחר בתא. אך כל האנזימים הם חלבונים. כל אחד מכיל כמה אלפי אטומים המקובצים בסדר קפדני. תכונותיו של האנזים נקבעות על-ידי הגיאומטריה של המבנה שלו. די בשינוי של רדיקל כימי יחיד, בהעברת אטומים ספורים, כדי לפגום במולקולה ולגרום לה לאבד את תיפקודה.

כל הכימיה של התא, דיוקה ויעילותה מבוססים איפוא על תכונותיהם של כאלפיים חלבונים-אנזימים, המזרזים את הריאקציות של חילוף-החומרים. מה שנוצר-מחדש בדייקנות בכל דור איננו איפוא אך ורק תא החיידק בשלמותו, אלא כל אחד מהאנזימים המנטרים את הכימיה של התא, כל אחד מהסוגים המולקולריים, המרכיבים אותו. מיצוי החלבון ובדיקתו דורשים תרבות המכילה לפחות ביליון חיידקים. חיידק יחיד מכיל כמה אלפי סוגים מולקולריים. ובכל זאת, כשכימאי מנסה לבודד חלבון מתוך התערובת הזאת ולנקות אותו, הוא מצליח בכך. כאשר הוא מתאמץ לערוך אנליזה של הרכב החלבון ולקבוע את רצף תתי-היחידות בשרשרת, הוא מצליח שוב. כשקריסטלוגרף מנסה לקבוע את הארגון של מולקולה ולגלות את המיקום המדויק של כל אטום, גם הוא מצליח. פירושו של דבר, שאלפי העותקים של החלבון, שכל אחד מסונתז על-ידי ביליון חיידקים, יש להם בדיוק אותן תכונות; שכולם בנויים בדיוק מאותן תתי-יחידות, הערוכות לפי אותו רצף; שלכולם יש בדיוק אותו מבנה ואותם אטומים

המפוזרים באותו אופן. בקיצור, כל חיידיקי התרבות מייצרים בקפדנות את אותם סוגים מולקולריים. אם יש שגיאות, הן מעטות מכדי שתתגלנה.

קביעות היצורים החיים במשך הדורות נצפית לא רק בצורותיהם. היא נצפית גם בפרטי החומרים המרכיבים אותם. כל סוג כימי משוחזר בדייקנות מדור לדור. אולם כל סוג כימי איננו יוצר עותקים של עצמו. חלבון איננו נולד מחלבון זהה. חלבונים אינם מתרבים. ההתארגנות שלהם תלויה בחומר אחר, חומצה דאוקסיריבונוקליאית, מרכיב הכרומוזומים. תרכובת זו היא היחידה בתא היכולה להתרבות על־ידי העתקת עצמה. זוהי תוצאה של המבנה המיוחד במינו שלה. חומצה דאוקסיריבונוקליאית היא, למעשה, פולימר ארוך, הנוצר לא משרשרת אחת, אלא משתי שרשרות, המצונפות יחד בסליל כפול. כל שרשרת מכילה שלד, הנוצר מקבוצות מסורגות של סוכר וזרחן. כל מולקולת סוכר קשורה לקצה כימי אחד בלבד – בסיס אורגני – שממנו יש ארבעה סוגים שונים. ארבע תתיחידות אלו חוזרות על עצמן מיליוני פעם לאורך השרשרת בצירופים ופרמוטציות שונים עד לאין סוף. לשם אנלוגיה, לעתים קרובות משווים את הרצף הליניארי הזה לסידורן של אותיות האל"ף־בי"ת לאורכו של טקסט כתוב. אין זה משנה אם מדובר בספר או בכרומוזום, היחודיות נובעת מן הסדר שהתתיחידות, האותיות או הבסיסים האורגניים, ערוכות שם לפיו. אולם מה שנותן לפולימר הזה תפקיד מיוחד במינו ברביה הוא טיבם של היחסים המאחדים את שתי השרשרות. כל בסיס אורגני בשרשרת אחת קשור בבסיס אורגני בשרשרת השניה, אבל לא סתם בכל בסיס שהוא. מערכת הקשרים הכימיים היא כזאת, שכל תתיחידה בשרשרת אחת תואמת אך ורק לאחת משלוש התתיחידות האחרות בשרשרת השניה. אם נסמן את ארבע התתיחידות על־ידי א, ב, ג, ד: א בשרשרת אחת היא תמיד מול ב בשניה, ו-ד תמיד מול ג. הסמלים הולכים בזוגות; שתי השרשרות משלימות זו את זו. הרצף בשרשרת אחת מכתיב את הרצף בשניה.

בזכות תכונות מיוחדות אלה של המבנה, צמד חומצת־הגרעין משוחזר בדייקנות. מאחר ששתי השרשרות משלימות זו את זו, כל

אחת מכילה את כל פרטי הרצף. ההתרבות של המולקולה נובעת איפוא מהיפרדות שתי השרשרות, שבעקבותיה כל שרשרת משחזרת את השרשרת המשלימה אותה. מאחר שמול ב יכול להיות רק א, וכן הלאה, יכולה כל שרשרת לכוון בביטחון את הסינתזה של הרצף המשלים. מנגנון זה, המצטיין בפשטותו, יוצר שתי מולקולות הזהות למולקולה המקורית. שיחזור הסיב של הכרומוזום הוא בעצם תעתוק, סימן אחר סימן. הכוחות האחראים להכרתה של כל תת־יחידה ולהנחתה במקומה הם אלה המכתיבים את היווצרותם של גבישים. כדי לחבר כל רדיקל עם זה הקודם לו, כדי להוציא אל הפועל את הכימיה של הפילמור, די באנזימים ספורים. בינתיים ידוע רק מעט על אנזימים אלה. אולם כמה מהם כבר בודדו. הם מעתיקים תומצה דאוקסיריבונוקליאית במבחנה, כשמספקים להם את החומרים הנחוצים לריאקציה, כלומר את ארבעת הבסיסים האורגניים, בצורה מתאימה. בתא החיידק התגלו גם מערכות מתקנות, ה'מריצות' את העותקים, בודקות את דיוקם ומתקנות שגיאות מסוימות.

מאחר שהוא המרכיב היחיד בתא החיידק המתועתק בדרך זו, סיב חומצת־הגרעין מנציח את המבנה של הסוגים הכימיים האחרים במשך הדורות. למעשה, תפקידו הוא לכוון את הסינתזה של החלבונים ולהנחות את התארגנותם. גן מסוים מתאים למיקטע מסוים בשרשרת חומצת־הגרעין. שם מקודדות ההוראות הדרושות לבנייתו של חלבון מסוים על־ידי מערכת מיספור שבסיסה ארבע. חומצת־הגרעין והחלבון הם פולימרים ליניאריים. כל אחד מאופיין על־ידי הרצף של התת־יחידות שהוא מכיל, על־ידי הסדר שלפיו הן ערוכות לאורך השרשרת. רצף חומצת־הגרעין קובע את הסדר של תת־יחידות החלבון. זהו תהליך חד־כיווני: העברת המידע נעשית תמיד מחומצת־הגרעין לחלבון, לעולם לא בכיוון ההפוך. אולם, בעוד המערכת־המצורפת של חומצת־הגרעין משתמשת רק בארבעה סמלים כימיים, זו של החלבונים משתמשת בעשרים. פעילות הגן, ההוצאה אל הפועל של ההוראות לסינתזת החלבון, דורשת איפוא טרנספורמציה חד־משמעית של מערכת הסמלים האחת למערכת האחרת.

ייצוגם של הגנים, שהגנטיקה הקלאסית ראתה אותם כמבנים בודדים, המסודרים כמו תרוזים במחרוזת, הוחלף איפוא על-ידי רצף ליניארי של סמלים כימיים – הגביש הלא־מחזורי שניבאו הפיסיקאים. המודל המתאר בצורה הטובה ביותר את הידע שלנו על התורשה הוא אכן זה של המסר הכימי. לא מסר הנכתב באידיאוגרמות כמו בשפה הסינית, אלא באל"ף־בי"ת הדומה למפתח מורס. ממש כפי שמשפט הוא מיקטע של טקסט, כך גן תואם למיקטע של חומצת־גרעין. בשני המקרים, אין כל מובן לסמל הבודד; רק לצירוף הסמלים יש 'מובן'. בשני המקרים, רצף נתון, משפט או גן, מתחיל ומסתיים ב'סימני פיסוק' מיוחדים. הטרונספורמציה של רצף חומצת־הגרעין לרצף של חלבון דומה לתרגום של מסר שהתקבל במורס, כלומר, היא נטולת מובן כל עוד לא תורגמה, לעברית למשל. דבר זה נעשה בתיווכו של 'צופן', הגותן את שוויון־הערך של הסימנים בשני ה'אל"ף־בי"תים'.

פעילות הגנים, כלומר, קביעת הסדר של התתי־יחידות בשרשרות החלבון, היא איפוא מבצע הרבה יותר מורכב מאשר הכפלתם, כלומר, קביעת הסדר של התתי־יחידות של חומצות־הגרעין. כדי לתרגם וליצור את הקשרים הכימיים בחלבון, תא החיידק משתמש בכלי מסובך ביותר. סינתזת החלבונים היא תהליך דו־שלבי, שכן התתי־יחידות של החלבון מקובצות ומפולמרות לא ישירות על הגן, אלא על חלקיקים קטנים בציטופלסמה, המשמשים קווי־יצור. הטקסט של החומצה הדאוקסיריבונוקליאית של הגן משועתק איפוא תחילה לסוג אחר של חומצת־גרעין, הקרויה חומצה ריבונוקליאית, על־ידי אותו אל"ף־בי"ת בן ארבעה סימנים. עותק זה, הקרוי 'שליח', מתחבר עם החלקיקים שבציטופלסמה ומביא להם את ההוראות להקבצת התתי־יחידות של החלבון בסדר המוכתב על־ידי רצף חומצת־הגרעין. תרגום הטקסט הגנטי שתועתק במסר נעשה בתיווכן של מולקולות אחרות הקרויות 'מתאמים'. מתאמים אלה מביאים את תתי־יחידות החלבון המתאימות אל קירבת תתי־יחידות חומצת־הגרעין ויוצרים בדרך זו תיאום חד־משמעי בין שני ה'אל"ף־בי"תים'. מאחר שהם נושאים מתאמים נכונים, החלקיקים נעים מקצה לקצה של חומצת־הגרעין השליחה, ממש כשם שהראש־הקורא ברשמקול נע לאורך הסרט.

תתייחידות החלבון מוצבות איפוא בסדר שהוכתב על-ידי הגן. כל תתייחידה מחוברת באופן עוקב לזו הקודמת לה על-ידי קשר כימי זהה. וכך שרשרת החלבון מסונתזת, צעד אחר צעד, מקצה לקצה.

היום מוכר הצופן הגנטי כולו. כל תתייחידת חלבון מתאימה לרצף מסוים של שלוש תתייחידות של חומצת-גריין, לשלושה בסיסים אורגניים, הקרויים שְׁלֶשָׁה (triplet). ארבע התתייחידות של חומצת-הגריין מאפשרות שישים-וארבע שלשות השונות זו מזו: התא מכיל איפוא 'מילון' שיש בו שישים-וארבעה מונחים גנטיים. שתיים או שלוש מהשלשות משמשות סימני פיסוק; בטקסט של חומצת-הגריין הן מציינות את תחילתם וסיומם של רצפים המתאימים לשרשרות החלבון. כל אחת מהשלשות האחרות של חומצת-הגריין 'משמעה' תתייחידת חלבון, חומצת אמינו. מאחר שיש רק עשרים תתייחידות חלבון, כל אחת מהן מתאימה לכמה שלשות, או שוות-ערך במילון של חומצת-הגריין, מה שמספק גמישות מסוימת בכתיבת התורשה. דומה שכל האורגניזמים, מאדם ועד חיידקים, יכולים לפרש כל מסר גנטי באופן נכון. דומה שהצופן הגנטי הוא אוניברסלי והמפתח שלו ידוע לכל עולם-החי.

משעה שנוערכו תתייחידות החלבון לפי סדר ונוצרו הקשרים ביניהן, השרשרת מתקפלת על-פני עצמה בדגם מסובך ומיוחד במינו. בדרך זו רוכש החלבון את צורתו הסופית, המעניקה לו תכונות מיוחדות, קטליטיות או אחרות. הטרונספורמציה הזאת של מבנה חד-ממדי למבנה תלת-ממדי עדיין איננה מובנת לפרטיה. אולם דומה שלא נדרש לה שום גורם מיוחד שאיננו מעורב כבר בסינתזה. דומה שהיא מתרחשת ספונטנית על-ידי פעולות-גומלין בין ה'שיורות' הכימיות המפוזרות לאורך השרשרת, שחלקן נמשכות זו לזו, אחרות דוחות זו את זו; משעה שנוצר הרצף, הוא יכול להפוך את עצמו באופן חופשי להתארגנות מסוימת במרחב, לתצורה מוגדרת בקפידה. חלבונים יכולים לעבור דנטורציה על-ידי טיפולים מסוימים, פיסיקליים או כימיים. ואז המולקולה מאבדת את צורתה; היא נפרמת והופכת שוב לשרשרת ארוכה. כאשר משיבים את התנאים הפיסיולוגיים, כמה שרשרות חוזרות למבנה התלת-ממדי היחודי שלהן; אחרות לא. קרוב לוודאי שחלבונים

מהטיפוס האחרון רוכשים את התצורה שלהם רק במהלך סינתזה, על-ידי יצירת 'גרעין' שסביבו מתארגנת שאר המולקולה. אולם בכל המקרים, רק באמצעות פעולות גומלין פיסיקליות אפשר להגיע לשלב-המפתח הזה בשחזור המולקולות: הטרונספורמציה מתוכנית לבניין, הפיכת הפוטנציאלי לתיפקודי.

תא החיידק מכיל מולקולה אחת ויחידה של חומצה דאוקסיריבונוקליאית, סיב ארוך שבו מסודרים כעשרה מיליוני סימנים. אורכו קצת יותר ממילימטר, גדול פי אלף בערך מקוטר התא שבתוכו הוא מגולגל ומצונף. במהלך גדילת החיידק, הסיב מועתק פעם אחת בלבד בכל דור, וכל אחד משני החיידקים שנוצרו על-ידי התחלקות התא מקבל עותק אחד. מולקולה זו של חומצת-גרעין מהווה את ה'כרומוזום' של החיידק: היא מכילה את כל הגנים הנחוצים לקביעת הארגון והתיפקודיות של תא החיידק. המערכת מסודרת איפוא כשלפניה תכלית אחת בלבד: לאפשר לכל חיידק לייצר שני חיידקים, שכל אחד מהם יכיל עותק אחד של הכרומוזום, ובתורו ייצור גם הוא שני חיידקים.

מה שמוצפן לאורך שרשרת חומצת-הגרעין, מה שמתועתק סימן אחר סימן ויועבר בדקדקנות מדור לדור, הוא אוסף של תוכניות מבניות, המפרטות את הארכיטקטורות של תא החיידק – אוסף הוראות המכתיבות עד לפרטי-הפרטים את כל סדרת מבני החלבון. התוכנה איננה משועתקת ומתורגמת בבת-אחת, אלא במיקטעים. את קריאת המסר אפשר להשוות לא לפריסה של מגילת נייר מקצה עד קצה, אלא לעיון בדפיו של ספר הוראות בשעת הצורך. חלקים מסוימים של התוכנה מכילים הוראות השולחות אל הוראות אחרות, בהתאם לנסיבות. הן אומרות מה צריך לעשות במצב נתון. למשל, בעמוד 35 מצויות ההוראות הבאות: 'עשה מכשיר לגילוי הסוכר גלקטוזה בנוזל התרבית; אם יש גלקטוזה, המשך על-פי ההוראות בעמוד 241; אם לא – דפדף הלאה.' בעמוד 428, למשל, יש תוכנית להרכבת מכשיר למדידת ריכוזו של מטבוליט חיוני בציטופלסמה, תתי-יחידה של חלבון, ארגינין: 'אם ריכוז זה הוא מעל לערך מסוים, אל תעשה דבר; אם הוא מתחת לערך זה, פעל על-פי ההוראות בעמודים 19, 64, 155, 601 ו-883.' במסר כלולים

רוב המצבים שחיידיק עשוי להיקלע אליהם. התוכנה מכילה איפוא את התוכניות של כל החלקים הדרושים כדי ליצור חיידיק ונותנת בידו את האמצעים להתמודד עם קשיי היום-יום. אך זוהי רק תוכנה. בתהליכים המובילים לתיעתוק של רצף חומצת-הגרעין, אם לצורך התרבות או לסינתזת חלבון, החומצה הדאוקסיריבונוקליאית ממלאת את התפקיד הסביל של מטריצת דפוס. מחוץ לתא, ללא האמצעים לבצע את התוכניות, ללא המכשיר הדרוש להעתקה או לתרגום, היא נשארת אינרטיית כמו סרט מגנטי מחוץ לרשמקול. כמו הזיכרון של מחשב, גם הזיכרון של התורשה איננו יכול לפעול כשהוא מבודד. מאחר שהוא יכול לתפקד רק בתוך התא, המסר הגנטי איננו יכול לעשות דבר בעצמו. הוא יכול רק להנחות את מה שמתבצע. כדי לייצר מכוונת על-פי תוכניות, מוכרחים להשתמש במכוונות. אף חומר מן החומרים שאפשר למצות מהתא אינו יכול להתרבות. רק החיידיק, התא בשלמותו, יכול לגדול ולהתרבות, מפני שרק ברשות התא יש גם תוכנה וגם הוראות שימוש, תוכניות ואמצעים להוציאן אל הפועל.

ויסות ובקרה

האמצעים להוצאה אל הפועל של התוכניות הם החלבונים. על תכונותיהם מתבססים כל הפעילויות של התא, הארכיטקטורה והשילוב שלו. החלבונים אינם פועלים על-ידי יצירת קשרים כימיים, אלא על-ידי התחברות לתרכובות אחרות. למעשה, המבנה שלהם מעניק להם איכות מיוחדת במינה: היכולת 'לזהות' במדויק סוג כימי אחד או יותר בתוך תערובת הטרוגנית ביותר. הדיוק והיחודיות של זיהוי זה קובעים את היחסים בין רכיבי התא. הם שולטים בכל הכימיה שלו.

אנזים יכול לזרוז את הטרנספורמציה של מטבוליט נתון, ורק את שלו, מפני שבחספוסים שעל שטח-הפנים שלו יש מעין סדק, שבתוכו רק סוג מולקולרי זה יכול להתמקם בדיוק. משעה שהסובסטרט מתיישב באתרו, ה'קצוות' של החלבון המקיפים אותו פועלים על כמה מהאטומים שלו. הכוחות המחזיקים יחד כמה

מן האטומים של הסובסטרט נחלשים; לכן חל שינוי בקשר שביניהם, למשל נתק. התוצר שנוצר בדרך זו כבר איננו ממוקם היטב בחלבון; הוא נוטש את הסדק, בהשאירו את החלבון ללא שינוי, ואת המקום פנוי למולקולה אחרת של הסובסטרט. כל זה קורה בשבריר שניה. הסוד של הכימיה הזאת מצוי איפוא בדיוקם של הדגמים הכימיים, באופן שכל אנזים מתאים לסובסטרט שלו: באלה תלויות יעילותן ומהירותן של הריאקציות. מאחר שהמטבוליט מזוהה על-ידי אנזים אחד בלבד, הריהו מובל בהכרח לאורך מסלול כימי נתון, המוכתב על-ידי הפעילות הקטליטית של האנזים. בתמורה, האנזים 'מדווח' היטב על טבעו של סוג כימי אחד ומתעלם מכל האחרים. עצם מבנהו קובע גם את הבחירה שלו וגם את פעולת-הגומלין שלו. אנזים ניחן איפוא בתכונות שייחס מקסוויל לִשְׂד שלו: בתוך תערובת של תרכובות המוכלות בתא, הוא 'רואה' סוג מולקולרי אחד, ואחד בלבד, שעבורו הוא פותח את דלתות הריאקציה.⁵ הדקדקנות של הסדר האופייני לשיחלופים של חומר ואנרגיה בתא תלויה בדיוקה של פעולת המיון המבוצעת על-ידי האנזים.

היחודיות של פעולת-הגומלין שקובעים חלבונים מסוימים, אם בינם לבין עצמם או עם תרכובות אחרות, קובעת גם את הארכיטקטורה של התא. למרות פשטותו היחסית, תא החיידק מכיל כל-כך הרבה סוגים כימיים שונים, הוא מייצג דרגת מורכבות כה גדולה, עד שקשה לגלות את הסידור שלו בשלמותו. אולם אנחנו מתחילים להבין מה קובע את צורתם של מושאים פשוטים מאוד, כמו וירוסים. וירוס הוא חלקיק שנוצר על-ידי מיקטע של חומצת-גרעין, הסגור במעטפת של חלבון. מאחר שאין לו אנזימים וגם לא כל הציוד הכימי הדרוש לסינתזות ולשינוע אנרגיה, הווירוס איננו יכול להיכפל בעצמו, אלא רק בתוך התאים שאותם הדביק, ואשר במגנוניהם הוא משתמש לצרכיו. רק בתוך תאים יכולות לצאת אל הפועל ההוראות המוכלות בחומצת-הגרעין של הווירוס: החלבונים של הווירוס מסונתזים וחומצת-הגרעין שלו מתועתקת; החלקים הנפרדים, שנוצרו בדרך זו, מסתדרים אחר-כך כחלקיקי וירוס חדשים. ברגע שהתנתקו זה מזה, חלקיקים אלה מדביקים תאים אחרים. וירוס איננו מתרבה איפוא על-ידי גדילה והתחלקות

כמו תא, אלא על-ידי ייצור בלתי-לוי של רכיביו, שלבסוף מקובצים ביחד כדי ליצור שוב חלקיק של וירוס חדש. ברור שווירוס ניחן בכמה מהתכונות של מערכת חיה, אך לא בכולן. הוא יכול להתפשט, להיכפל ולעבור מוטציות. הוא יכול לכוון את ייצורם של חלבונים וירליים, המשפיעים על הסביבה לטובתו. הוא נשלט איפוא על-ידי האבולוציה בדרך של ברירה טבעית. אך, לעומת זאת, הוא יכול לממש את התוכנה הגנטית שלו ולהיכפל רק בסביבה שכבר יכולה לבצע פעולות של חילוף חומרים, להפיק אנרגיה ולסנתז פולימרים; במלים אחרות, בתא. וירוס איננו יכול איפוא להיחשב לאורגניזם. מחוץ לתא, חלקיק הווירוס איננו אלא מושא אינרטי. רק המערכת תא-ווירוס ניחנה בכל תכונות החי. הדבקה וירלית היא התערבות בסדר התאי כתוצאה של פלישת מסר כימי זר.

יש סוגים רבים של וירוסים, בעלי צורות וגדלים שונים. בקטנים ביותר, חומצת-הגרעין מכילה לכל היותר כמה אלפי תתי-יחידות בסיסיות, שדי בהן לקבוע את הרצף של שלוש או ארבע שרשרות חלבון, ותו לא. מעטפת החלבון של וירוסים קטנים אלה, אשר צורתם דומה למקלונים או לכדורים, בנויה ממולקולות חלבון ספורות מאותו סוג מולקולרי. הדרך שבה מולקולות זהות אלו מקובצות יחד קובעת את הארכיטקטורה של הווירוס. את החלבונים של המעטפת הווירלית אפשר לבודד ולנקות. כשמניחים אותם בתמיסה בתנאים מסוימים, המולקולות של חלבון זה מתקבצות יחד בתהליך הדומה להתגבשות, ויוצרות חלקיקים שצורתם זהה בדיוק לווירוס. כאשר תמיסת החלבון מכילה גם מולקולות של חומצת-גרעין ספציפית, הווירוס משוחזר והחלקיקים הנוצרים ניחנים בכושר הדבקה. שוב, המבנה המיוחד של החלבון, הדרך המיוחדת שלפיה מסודרים האטומים שלו, הוא הנותן לו יכולת להתחבר באופן ברירני עם מולקולות חלבון זהות אחרות, במבנה בעל סימטריות וצורה המוגדרים בקפידה. דגמים כימיים מסוימים הם המאפשרים למולקולות של החלבון הזה לזהות זו את זו ולהתארגן בסדר גיאומטרי מיוחד במינו. אין צורך בתבנית כדי לקבל את הצורה הזאת, וגם לא במקור אנרגיה או בכוח מסוים, חוץ מאותן פעולות-גומלין בין קבוצות של אטומים,

שעלידיהם מתארגנים וגדלים הגבישים בעולם־הדומם. אותן פעולות־גומלין נוטלות חלק במתן צורה לוורוסים מסובכים יותר, הנוצרים, למשל, מראש פולי־הדראלי, שאליו מחובר זנב ארוך. במקרה זה, כמה סוגים של חלבונים, ולא אחד בלבד, חייבים להסתדר, להתאים זה לזה בדגמים סימטריים חוזרים ונשנים, כדי לבנות את הארכיטקטורה המורכבת המכילה את חומצת־הגרעין. הוא הדין באברוני התא, כגון חלקיקי הציטופלסמה, שבהם מיתרגמת שפת חומצת־הגרעין לשפת החלבון ומקובצים החלבונים. וכך גם בשוטונים, המקשטים את הפריפריה של תא החיידק הקטן.

צורות רבות, המעוררות את התפעלותנו בתאים, מציגות תכונות הדומות לתכונות של גבישים. התגבשות, משמע, איחוד של יחידות דומות, גיאומטריה הנקבעת בקפדנות על־ידי כוחות המסדרים ומאחדים מולקולות זהות. יהיו המבנים האלה חלקיקים, שכבות, סיבים או אבובים, תחת המיקרוסקופ נראה שהם ניחנים תמיד באופייניים האלה. עד עתה איננו יודעים מהו הארגון המולקולרי של מרבית האברונים המורכבים ביותר שבתא, במיוחד אלה הנמצאים בקרום. אולם אנחנו בטוחים עתה, שבניית האברונים האלה איננה זקוקה לעיקרון מיסתורי כלשהו, כוח שאיננו ידוע לפיסיקה, או גורם שאיננו מוכל במבנה של רכיבי התא עצמם. רבגוניות הצורות ויופןן, כל אותה גיאומטריה של יצורים חיים המעוררת בנו השתאות, כולם מבוססים כנראה על תופעה הידועה לנו זמן רב: התהוות גבישים. גם הפעם, ההבדל בין עולם־החי לעולם־הדומם איננו מצוי בטבעם, אלא במורכבותם. גם הפעם, השילוב של תא החיידק מבוסס אך ורק על תכונותיהם של חלבונים מסוימים, על יכולתם לזהות באופן ברירני סוגים מולקולריים אחרים. הגורם היחיד המעניק אחדות למערכת מורכבת כל־כך, היא הדרך שבה מתואמים הרכיבים שלה. תא החיידק, הבנוי מכמה אלפי סוגים מולקולריים, המשמש מרכז לכמה אלפי ריאקציות כימיות המתרחשות בעת ובעונה אחת במהירות גבוהה, לא יכול היה להיות שלם תיפקודי ללא לכידות גבוהה של רכיביו. כל השיחלופים של חומר ואנרגיה חייבים להיות מוגדרים עד לאחרון פרטיהם, כדי להשיג את תכליתו של החיידק:

יצירת שני חיידקים. לפיכך, תא החיידק הקטן איננו יכול להיות סתם אוסף של סוגים מולקולריים, הסגורים בתוך שק ומצייתים לחוקים סטטיסטיים המנטרים יסודות שאמנם צמודים זה לזה אך גם עצמאיים. חייבת להיות רשת תקשורת, אשר תודיע לרכיבים המרוחקים זה מזה בסקלה האטומית, ותכוון פעילויות מסוימות למען טובת הכלל והתכלית המשותפת. בכל שלב של כימיית התא, מעגלי־בקרה נכנסים לפעולה ומתאמים ריאקציות, מכוונים אותן לפי דרישות הייצור. בתמורה לבזבז קל של אנרגיה, התא מתאים את עבודתו לצרכיו. הוא מייצר רק מה שהוא צריך, ורק כאשר הוא צריך. המפעל הכימי הוא אוטומטי לגמרי.

תיאום הפעילויות הכימיות בתא, משמע, בראש ובראשונה, איתחול או הפסקה של שרשרות ריאקציה, בהתאם לתנאים הקיימים. משמע, העברה מתמדת של מידע ל'סוכנים' המוציאים אל הפועל את הפעילויות שלהם עצמם, כדי שיוכלו להתאים אותן לפי המצב. משמע, כיוון פעולות־גומלין בין רכיביהם, השונים זה מזה במבניהם, אך מתפקדים יחד. שילוב אפשרי רק במידה שהקפדנות של ההוראות הרשומות בתוכנה הגנטית מאוזנת על־ידי הגמישות של המידע הנאסף על המצב במקום, מצב המערכת וטבעה של הסביבה, כלומר המצע. משחק־גומלין זה בין מה שצריך להיעשות ובין מה שנעשה בפועל קובע כל העת את פעילותו של כל רכיב. עצם קיומן של פעולות־גומלין אלה משחרר את המערכת מהמגבלות התרמודינמיות שלה ומאפשר לה להילחם בנטיה המכנית לא־יסדר. יחד עם איברי התפישה, ומכוונים אותם, צריכים להיות איברים מבצעים, היכולים לבדוק 'מה קורה' בעולם החיצוני, להבחין בנוכחותן של תרכובות מסוימות, הפועלות כאותות, ולמדוד את ריכוזיהן. את התפקיד הזה ממלאים חלבונים מסוימים, הידועים כבקרים, שהמבנה שלהם מעניק להם תכונות מיוחדות. למעשה, חלבונים אלה יכולים להתחבר באופן ברירני והפיך לא רק עם סוג מולקולרי יחיד, אלא עם שני סוגים מולקולריים או יותר, השונים זה מזה בטבעם ובמבנה שלהם, ואינם נכנסים לשום היפעלות כימית בינם לבין עצמם. רק בתיווכו של חלבון־בקר יכולה להתבצע פעולת־גומלין מיוחדת בין תרכובות כאלו: אם מגיחים אותן לעצמן, תרכובות אלו יכולות רק להתעלם זו מזו, כימית.

לחלבונים אלה יש מבנים כפול־ראש כביכול: ראש אחד נותן לחלבון את היכולת לזהות סוג כימי מיוחד, וכך לבצע תיפקוד מסוים, קטליטי או אחר; הראש האחר נותן לו יכולת לקשור תרכובת שונה לחלוטין, המשנה את הקונפיגורציה של החלבון, וכך משנה את תכונותיו של הראש הראשון. לפי נוכחותה או העדרה של תרכובת זו, ואם הגיעה או לא הגיעה לריכוז מסוים בתא, החלבון־הבקר מתנוודד בין שני מצבים: פעילות או אי־פעילות. לכן תרכובת זו היא המשנה את תיפקודו של החלבון, על־ידי הווריאציות שלה, וכתוצאה מכך גם את שרשרת הריאקציות שהיא נמנית עמה. היא פועלת כעין אות כימי המכניס את החלבון למצב 'פעל' או 'הפסק'. חלבונים־בקרים אלה ממלאים איפוא תפקיד של מזווגים בין התיפקודים השונים של התא, בין אלפי הריאקציות המשתפות פעולה באגירה או בשינוע של אנרגיה ושל פוטנציאל כימי. פעולות־גומלין אלה חשובות מפני שהן משוחררות מהמגבלות העיקריות המשפיעות על הריאקציות הכימיות: מאחר שהן הפיכות ואין מעורבים בהן קשרים כימיים אמיתיים, הן מכניסות לפעולה רק אנרגיות־שפעול שהן חלשות או אפסיות; מאחר שאין הן כפופות לחוקי הזיקה וההיפעלות הכימיות, הן יכולות לממש זיווגים בין כל מיני סוגים מולקולריים. טבען של פעולות־הגומלין, עצם העובדה שהן יכולות בכלל להתקיים, תלויים לגמרי בארגון של מולקולת החלבון, כלומר, בסופו של דבר, ברצף של חומצת־גרעין. ללא 'סוכני' זיווג אלה, ללא חלבונים כפול־ראש אלה, התיאום של התא היה נתקל בקשיים שאין להתגבר עליהם מבחינת המבנה הכימי והתרמודינמיקה גם יחד. עצם נוכחותם של מבנים אלה היא היוצרת רשת תקשורת בין התא לסביבה, בין גנים לציטופלסמה ובין זוגות של רכיבים שאין ביניהם זיקה כימית.

מעגלי־הבקרה מבוססים על החלבונים האלה. כמו באלקטרוניקה אפשר לערוך את אותם יסודות במעגלים שונים ולבצע את התיפקוד הנדרש בנסיבות שונות. חלק מהחלבונים־הבקרים מגלים את נוכחותו של מטבוליט מסוים בנוזל התרבית; אולם התוצא המתקבל משתנה בהתאם לטבעה של התרכובת ולתפקידה בכלכלת התא. אם זהו, למשל, סוכר היכול לספק אנרגיה, נוכחותו

מעוררת מיד את סינתזת האנזימים המעורבים בפירוקו. לעומת זאת, אם זהו מטבוליט חיוני, שהתא יכול לייצר, נוכחותו בנוזל התרבית עוצרת בבת־אחת את היווצרות האנזימים הלוקחים חלק בסינתזה שלו עצמו. בשרשרת של ריאקציות, ה'סוכנים' המוציאים אל הפועל מדווחים בהתמדה, על־ידי התוצר הסופי, על התוצאה של פעילותם, והם מסתגלים למצב בהתאם. כל מטבוליט המסוננתו על־ידי התא מכוונן את הייצור שלו עצמו באמצעות לולאת משוב.

כמו מימסרים במכונות אלקטרוניות, החלבונים־הבקרים מגיבים לנוכחותו של אות כימי רק מעל לסף מסוים. תגובתם באה מהתנודה של החלבון בין שני מצבים אפשריים. היא מייצגת בחירה בין שתי חלופות: בין פעילות לאי־פעילות, פעל והפסק, כן ולא. למעשה, כל מה שהחלבון יכול לגלות הוא נוכחות או העדר של תרכובת נתונה, דגם כימי מוגדר. מערכות בינאריות כאלה מתפקדות בכל הרמות של חילוף־החומרים לתיאום הרבגוניות. הן מתערבות בהתמדה להתאים את התיפקודים לפי צורכי התא ומצב הסביבה; לכוונן את פעילויות הקטליזה בשרשרות ריאקציה; להחליט אילו מבין הגנים חייבים להתרגם לחלבונים; להרשות פעם אחת בכל דור, ופעם אחת בלבד, את שחזורו של הכרומוזום; לתאם את התחלקות התא. השילוב של התא, הלכידות של הפעילויות שלו, תלויים איפוא לגמרי בקיומם של מבנים חלבוניים אלה, שהם תוצרים טהורים של הברירה הטבעית. כל פעולות־הגומלין שאפשר להעלות בדמיונו יכולות להתממש בין סוגים מולקולריים השונים מאוד זה מזה, רק בתנאי שקיים המבנה החלבוני המתאים. באופן מעשי, אפשר לצפות בחיבורים שהם בלתי־צפויים ביותר מבחינה כימית, אך יעילים ביותר מבחינה לוגית. כשמבחינים במסלול מטבולי חדש, מתברר שהבקרה שלו גורמת לכך שתיפקוד התא יהיה יעיל יותר וגם כלכלי יותר. ובדיוק יתרון מעין זה הוא המעניק פרס להתרבות מעל לנורמה. הלוגיקה של מערכת בקרה מבוססת על שאיפתו של חיידק ליצור שגי חיידקים במחיר הנמוך ביותר.

לכן, בין אם בוחנים את תיפקודיו של תא החיידק, את המורפולוגיה או את השילוב שלו, משפחת החלבונים מצויה תמיד במקום הראשון. ביניהם מוצאים את ה'סוכנים' המוציאים אל הפועל, כמו

גם את חלקי השלד או את איברי החישה. יהיה תפקידם אשר יהיה, החלבונים יכולים להתחבר באופן ברירני עם תרכובות אחרות על-ידי מה שהכימאים מכנים התחברויות 'לא-קוואלנטיות', שאין מעורבים בהן קשרים כימיים אמיתיים. מה שנותן לחלבונים מעמד מועדף בתא היא יכולתם לזהות דגמים כימיים יחודיים בתוך תערובת של תרכובות, מורכבת ככל שתהיה. אם כן, החלבונים 'מרגישים' סוגים כימיים, 'בודקים' את הרכב המצע, 'תופשים' גירויים יחודיים מסוגים שונים. מאחר שהם 'מכירים' רק אותם, הם בוחרים להתחבר עמם. בכל הרמות, החלבונים מתפקדים כמו השדים של מקסוול, ופועלים נגד הנטיה המכנית לאי-סדר. הם ניחנים ב'דיעה' שבזכותה מתקיים ארגון התא.

עצם קיומה של כל פעולת-גומלין נובע מהמבנה המיוחד במינו של החלבון המתאים. משמע, שהאנטומיה של תא החיידק וגם הפיסיולוגיה שלו תלויות כמעט לגמרי בפרטיהם של כמה רצפים של חלבון. משמע, ששחזורם של המבנים האלה, ולפיכך של כל המערכת, אפשרי רק מפני שהסדר המולקולרי התלת-ממדי כולו נקבע על-ידי סדר אחר, חד-ממדי. כבר בופון הצביע על הקושי שבהעתקת ארכיטקטורה במרחב. ואולם קושי זה מצוי בכל הרמות, הן בצורות הנראות והן במולקולות. הביולוגיה המולקולרית החליפה את מודל התבנית הפנימית במודל המסר הליניארי. שכן, מבין כל הסידורים של יסודות החומר, אין ספק שהרצף הוא זה שניתן לשחזור בצורה המדויקת ביותר ובמחיר הנמוך ביותר. בין אם נתייחס למערך של התכונות האופייניות באורגניזם, או למערך של האטומים במולקולה, יש רק דרך אחת שאפשר לייצג שחזורו של מושא: הנחתו של כל חלק במקומו בהעתק חייבת להיות מודרכת על-ידי החלק התואם לו במקור. אין כל אפשרות לשחזור משהו אלא אם כן ניתן לסמן כל פרט מיוחד שבו, אלא אם כן ניתן לזהות כל דגם וכל פרט בעל משמעות. לא כן במבנה תלת-ממדי: רק שטח-הפנים נגיש, לא הפנים. הגדילה מוגבלת איפוא להוספת חלקים חדשים על-גבי חלקיו הנגישים של המבנה. זהו בדיוק המנגנון המפקח על היווצרותו של גביש, על-ידי חזרה מונוטונית של אותו דגם. לעומת זאת, די קל להעלות על הדעת את שחזורו של שטח-פנים, שבו שום פרט אינו חבוי.

תיאורטית, אין דבר שימנע שחזור מדויק של תווך דו־ממדי, למשל; או מוטב, של שני תווכים, שכל אחד הוא השתקפותו של האחר, כבמראה. אבל מעשית, הרבה יותר מסובך להעתיק סוג זה של מבנה מורכב כל־כך מאשר רצף פשוט. מה שמייעל את שחזורן של המולקולות, מה שאולי אף מאפשר זאת, הוא קיומו של יחס חד־משמעי בין שתי מערכות של סדר: אחת, הרצף הכפול של חומצת־הגריין, שנשארת תמיד ליניארית ולפיכך מתעתקת את עצמה ללא קושי; האחרת, רצף החלבון המתהפך באורח ספונטני וללא שום דו־משמעות למבנים תלת־ממדיים יחודיים. אם מורכבות במרחב יכולה לשחזר את עצמה, הרי זה משום שביסודה מצויה פשטותו של רצף; משום שבעולם החי, הסדר של הסדר הוא ליניארי.

העתק ושגיאה

עקרונית, מספר הרצפים האפשריים של חומצת־הגריין, ולפיכך של מבני החלבון, הוא כמעט בלתי־מוגבל. בימינו עדיין ידוע רק מעט על מגבלות מבנה שאילוצים פיסיקליים מסוימים עשויים להטיל. על כל פנים, מה שאפשרי עולה בהרבה על מה שמומש. תא החיידק הקטן מכיל רק כמה אלפי סוגים של חלבון; אך כל אחד מהם מותאם באופן מושלם לתיפקודו; כל אחד תורם, בדייקנות וביעילות המעוררים את השתאותנו, למבצע של האורגניזם: ייצורם של שני אורגניזמים. מה שמגלה חקר תא החיידק היום היא התוצאה של התרבויות עוקבות במשך שני מיליארדי שנים, חתך־הרוחב של שלשלת האבולוציה, שנעשה בתקופה הנוכחית. מובן שאין האבולוציה פועלת על רכיביו של החיידק ואף לא על החיידק בשלמותו, אלא על אוכלוסיות גדולות. אף־על־פי־כן, עצם טבעו של מנגנון האבולוציה מוביל אותה לשים לב לפרטי־פרטים, להעמיד במבחן כל מבנה מולקולרי, ולהתאימו תמיד בדיוק רב יותר לתיפקודו. ביצורים פשוטים כמו חיידקים, הקריטריון היחיד הידוע לברירה הטבעית הוא קצב ההכפלה. במירוץ ליצירת צאצא, יש מחיר לכל דבר: לפיגור הקטן ביותר, לעיכוב הקצר ביותר, לסטייה הקטנה ביותר, בתנאי שהם תורשתיים. זהו חוק שאין בו

ויתור או רחמים. לכל הבדל הזעיר ביותר במבנה, ומתוך כך בתיפקוד, יש כמעט בהכרח תגובה אבולוציונית כשהוא שב וחוזר בכל דור. אם מופיע מבנה היכול לקשור כמה מטבוליטים, אם בדרך זו נוצרים מעגלים מסוימים, היכולים לתרום לבקרה, אזי מיד מועדף שחזורו של הכרומוזום שחל בו שינוי. ברירה טבעית בוחרת בין אורגניזמים קיימים. ואולם בדיעבד, הכול קורה כאילו בחרה, בזה אחר זה, את הסוגים הכימיים המרכיבים את החיידק; כאילו פיסלה כל מולקולה וליטשה כל פרט.

לפיכך, בתוכנה הגנטית כתובה התוצאה של כל ההתרבויות בעבר, אוסף ההצלחות, שהרי כל עקבות הכשלונות נעלמו. המסר הגנטי, התוכנה של האורגניזם בן-ימינו, דומה איפוא לטקסט ללא מחבר, שמגיה תיקנו למעלה משני מיליארדי שנים; מגיה ששיפר, עידן והשלים אותו בהתמדה, וסילק בהדרגה כל מה שאיננו מושלם. מה שמתועתק ומועבר היום, כדי להבטיח את יציבותו של המין, הוא טקסט זה, שהזמן משנה אותו ללא הרף. זמן, במקרה זה, משמעו מספר העותקים של המסר הבאים זה אחר זה, מספר הדורות העוקבים, המובילים מהורה קדמון עלום ועד לתא החיידק שלנו. אפשר שלעולם לא נדע את פרטי הנתיבים שהאבולוציה הלכה בהם. אין זה סביר שנוכל לגלות אי-פעם כל שלב שבעזרתו התארגנו אטומים, אולי במשך כמה מיליוני דורות, ליצירת המבנה המרשים של תא החיידק. אנחנו יכולים להיות בטוחים, שלפחות חלק מהמנגנונים המתגלים עלידי הגנטיקה והביולוגיה המולקולרית אכן משתתפים בווריאציות ובאבולוציה של היצורים החיים. אולם קשה להגדיר את תפקידם ולהעריך את חשיבותם.

הדבר שאולי מפתיע אותנו יותר מכול, בפעולות שתא החיידק מבצע, הוא דיוק הביצוע. אלפי ריאקציות מתרחשות בדיוקנות ובביטחון, שהם מעבר לכל מה שטכנולוגיה ותעשייה מסוגלות לבצע. בתא אף יש מנגנונים מיוחדים לגילוי פגמים במלאכת הבניה ולתיקונם. אחזקת המערכת, קביעותה במשך הדורות, תלויה בדיוקנות זו, המשמרת את האורגניזם מההתפוררות המאימת בהכרח על כל מערכת מכנית. בסופו של דבר, כשלונות שהם חשובים דים ועלולים לגרום למותו של התא, או, ליתר דיוק,

לאי־יכולתו להתרבות, משפיעים על חיידק אחד מתוך אלף במהלך הגדילה. ואולם דייקנות אין משמעה העדר טעויות. פה ושם מצליחות להתגנב טעויות ספורות. אלה נחלקות לשתי קבוצות: אם הן מועברות, או אינן מועברות, לצאצאים, אם הן משנות את ההוראות הגנטיות עצמן או מפריעות להוצאתן אל הפועל. במקרה האחרון, טעויות עלולות להתגנב לפעולות השעתוק, ובמיוחד לפעולות התרגום, הכרוכות בציד מורכב. למשל, אם תתייחידה של חלבון הונחה בטעות מול שלשת חומצת־גרעין בעלת משמעות שונה במילון. אף־על־פי שמדובר בשינוי של סמל אחד בלבד, הרצף עשוי ליצור חלבון שונה, שאיננו יכול להבטיח את ביצועו של התיפקוד הנדרש. אולם טעויות מסוג זה הן נדירות, מאחר שאפשר לנקות חלבון ולקבוע את הרצף המדויק של תתייחודתיו מבלי שתתגלה שום דר־משמעות. טעויות כאלו אינן מסוכנות בדרך־כלל לתא, מאחר שאין זה חשוב כלי־כך אם הוא מייצר מולקולה פגומה של אנזים, או שתי מולקולות פגומות, מתוך כאלף המבצעות את אותה העבודה. אלה הם רק פגמי ייצור, תאונות שאין להן שום חשיבות למין.

רק לאותן טעויות הגורמות לשינוי במסר הגנטי עצמו – כלומר, מוטציות – יכולות להיות תוצאות חשובות למין, כי מרגע שהופיעו, הן מתועתקות בנאמנות מדור לדור, בהגיע תורן. את המוטציות, מקורן ואופן ביטוֹן גיתן לחקור בחיידקים בקלות וביעילות רבות יותר מאשר באורגניזמים אחרים. למעשה, אפשר להפעיל לחץ ברירני קיצוני על אוכלוסיות עצומות, לשנות אותן בכיוון הרצוי לנו. בדרך זו יכול הגנטיקאי לגרום להופעתם של המוטנטים הנדירים ביותר. הוא צריך רק לשים כמה מיליארדי אורגניזמים, המוכלים בטיפה אחת של נוזל תרבית, בתנאים שרק המוטנט המבוקש יוכל להתרבות בהם. ואז קל למדי למדוד את תדירות המוטציות, להגדיר את מנגנוןן, לחפש קשר אפשרי של סיבה ומסובב בין תיפקוד למבנה. טבען של מוטציות מוכתב על־ידי עצם הארגון של הטקסט הכימי. מוטציה מופיעה כאשר משמעותו של הטקסט משתנה, כשמופיע שינוי ברצף חומצות־הגרעין המכתיב את רצף החלבון, ולפיכך שינוי במבנה הממלא תיפקוד. מוטציות נגרמות בגלל שגיאות הדומות לאלו שמכניס מעתיק או מדפיס

לתוך טקסט. מסר של חומצת-גרעין, כמו טקסט, ניתן לשנות על-ידי החלפתו של סימן אחד באחר, על-ידי החסרה או הוספה של סימן אחד או יותר, על-ידי העברת סימנים ממשפט למשפט, על-ידי היפוך של קבוצת סימנים – בקיצור, על-ידי כל דבר המשבש את הסדר שנקבע מראש.

מה שמאפיין את האירועים האלה הוא שאי-אפשר לנתב אותם בכיוון מסוים, אם על-ידי הסביבה או על-ידי רכיב תאי כלשהו. השינויים בטקסט הכימי אינם נגרמים בעקבות שינוי ברצף שנבחר מראש, אלא באופן עיוור. על-ידי שימוש במגיבים מסוימים או בהקרנות מסוימות, הידועים ביכולתם לשנות קצה כימי מסוים, אפשר להשפיע באורח ברירני על אחת מתוך ארבע התתי-יחידות של חומצת-הגרעין, לגרום להחלפת אות אחת של טקסט באחרת, ב-א, למשל. אבל ב חוזרת מיליוני פעם לאורך השרשרת; היא נמצאת פעמים רבות בכל מיקטע של המסר, בכל גן. הריאקציה הכימית איננה יכולה לבחור ב מסוימת אחת; היא פועלת באופן אקראי, וכל אחת מבין מיליוני ה-ב משתנה ל-א. למעשה, המולקולה היחידה הצריכה לדעת את רצף חומצת-הגרעין, כדי לקבוע את הסדר במהלך ההעתקה, היא חומצת-הגרעין עצמה. בתהליכי סינתזת החלבון, המידע מועבר תמיד בכיוון אחד: מחומצת-הגרעין לחלבון, לעולם לא בכיוון ההפוך. אין בטבע סוג מולקולרי כלשהו, היכול לשנות באופן מכוון את רצף חומצת-הגרעין, אם בין האנזימים המשמשים למתן הוראות לתתי-יחידות של חומצת-הגרעין בעת תהליך ההעתקה ואם בין החלבונים-הבקרים, הפוקדים על מיקטעי חומצת-הגרעין: 'הפעל' או 'הפסק'. מולקולות אלו יכולות להתחבר אל חומצת-הגרעין, אבל אין הן יכולות לשנות את רצפי המסר. מעצם טבעו של החומר הגנטי, של קשריו עם מרכיבי התא האחרים, אין שום סוג מולקולרי יכול לשנות את התוכנית המחליטה על צורתה של המולקולה. משמע, אין אפשרות שגן ישתנה על-ידי התייחסות לתיפקוד שאותו הוא מנטר. מוטציות, בין אם הן מופיעות באופן ספונטני או שהן מושרות באופן מלאכותי, משנות תמיד באקראי את הסדר של רצף הגלקח באקראי מתוך התוכנה הגנטית כולה. כל המערכת מסודרת באופן שמוטציות תהיינה שגיאות עיוורות. אין בתא שום רכיב

המשמש לפענוח התוכנה בשלמותה, אפילו לא 'להבנת' רצף ולשינויו בהתאם. אותם רכיבים המתרגמים את הטקסט הגנטי מבינים רק את משמעותן של שְׁלֹשׁוֹת, כל אחת בנפרד. רכיבים אלה, העשויים לשנות את התוכנה כשהם משחזרים אותה, אינם מבינים אותה. אילו היה קיים רצון המבקש לשנות את הטקסט, לא היה עומד לרשותו שום אמצעי פעולה ישיר. הוא היה צריך ללכת בדרך הארוכה, הדרך העקיפה של הברירה הטבעית.

כל מוטציה, כל שגיאה בהעתקה, משפיעה על סימן אחד או יותר בטקסט הגנטי. כל אחת מהן משנה גן אחד או יותר. ולפיכך, שינוי בחלבון אחד או יותר. בהתאם ל'שימושיות' של מבנים אלה, האם הם מעודדים או לא את תכליתו של החיידק להתרבות, נקבע אם למוטציה זו יהיה או לא יהיה יתרון על פני בנות סוגה. מסתבר שבכל המבנים והתיפקודים שמוצאים היום באורגניזם, הנותנים לו תנאים הדומים לסביבתו הטבעית, חל עידון על-ידי ברירה במשך מיליוני דורות. הם כה מדויקים ויעילים, עד שבדרך-כלל שינויים בתוכנה יכולים רק לגרום להפחתה בתיפקוד, או אפילו לאיבודו. רק כאשר מתרחש בסביבה שינוי קיצוני, יכולה מוטציה להועיל במקצת לאורגניזם. גם אם כמה מיליארדי פרטים יחידים נכחדים, מפני שאיבדו את יכולתם להכפיל את עצמם, די בהתרבותם של מוטנטים ספורים, כדי שיסתגל המין לתנאים חדשים. למוטציות מסוימות, הגורמות נזק בתנאים רגילים, יש יתרון במצבים חריגים.

מרבית המוטציות כרוכות בשינויים באיכות, לא בכמות. הן משבשות את הסדר של הטקסט הגנטי, אך אינן מוסיפות לו דבר. לעומת זאת, האבולוציה פועלת על-ידי הגדלת מורכבותו של האורגניזם, ולפיכך, על-ידי הרחבת התוכנה שלו. שני סוגים של אירועים יכולים להגדיל את תכולתו של המידע הגנטי בתא החיידק. ראשית, אם קורה לעתים, בעת שחזור הכרומוזום, שאותו מיקטע מועתק פעמיים. הדבר דומה לשגיאה בסדר דפוס, כאשר, מבלי לשים לב, אותה שורה מופיעה פעמיים. מכאן ואילך, שתי הדוגמאות של המיקטע הגנטי שבות ומופיעות דור אחר דור. אותו חלבון נוצר על-ידי שני העותקים של אותו גן. אולם האילוצים שמפעילה הברירה לשימורם של התיפקודים השונים משפיעים רק

על עותק אחד של הגן. העותק האחר יכול להשתנות כמה שהוא רוצה ולעבור מוטציות באופן חופשי לגמרי. כבר אין וריאציות אלה צריכות להוות יתרון לתא, כדי שיונצחו מדור לדור. די בכך שאין הן מזיקות. קרוב לוודאי, שבזכות חזרות מעין אלו, קמעה־קמעה, חוליה אחר חוליה, נוצרו בהדרגה השרשרות של הריאקציות הכימיות.

לחיידיקים מסוימים גם יש אמצעי אחר להרחיב את התוכנה הגנטית שלהם. בדרך־כלל, המיקרואורגניזמים מבודדים זה מזה. אין ביניהם כל תקשורת שהיא. אין הם מחליפים ביניהם דבר. הם אפילו מוגנים מיחסים כלשהם על־ידי דופן התא שלהם. ובכל זאת, לפעמים מתקיימות העברות של חומר גנטי מתא לתא, אם בתיווכו של וירוס, או בתהליכים המזכירים מיניות ביצורים עילאיים. אולם לתוספת זו של חומר גנטי יש השפעה מתמשכת על צאצאיו של התא רק במידה שהמיקטעים שהוחדרו באופן זה מצליחים להשתרש שם, להתרבות ולעבור מדור אחד לבא אחריו. השתלה כזאת מתרחשת לעתים על־ידי רקומבינציה גנטית. כך אפשר להחליף מיקטע של כרומוזום במיקטע הומולוגי מפרט־יחיד אחר. באוכלוסיות החיידיקים, הנכפלות בתנאים שונים, נוטות להיווצר מערכות גנטיות שונות בהתאם לדרישות הסביבה. באמצעות רקומבינציה, היסודות של טקסטים גנטיים, הגנים מפרטים־יחידים שונים, יכולים להסתדר־מחדש בצירופים חדשים, שיש בהם לפעמים יתרונות להתרבות. אף־על־פי שמיניות איננה למעשה אופן הרבייה בקרב החיידיקים, שבדרך־כלל מכפילים את מספרם על־ידי התחלקות, היא מאפשרת בכל זאת ערבוב של תוכנות גנטיות שונות הקיימות במין, והתוצאה היא הופעת טיפוסים גנטיים חדשים.

הרקומבינציה רק מסדרת־מחדש את התוכנות הגנטיות באוכלוסיות; אין היא מוסיפה להן דבר. אולם יסודות גנטיים מסוימים מועברים בכל זאת מתא לתא ופשוט מיתוספים לחומר הגנטי שכבר קיים שם. ההוראות שהם מכילים אינן חיוניות לגדילה או לרבייה. אולם תוספת זו לטקסט הגנטי מאפשרת לתא להקים מבנים חדשים ולבצע תיפקודים חדשים. יסוד מטיפוס זה הוא

הקובע, למשל, התמיינות מינית במינים מסוימים של חיידקים. יתרה מזו, היות שאין הוא חיוני, רצף חומצת-הגרעין המוכל ביסודות עודפים מעין אלה איננו נתון תחת מגבלות היציבות שהברירה הטבעית קובעת לכרומוזום של החיידק. יסודות אלה הם תוספת חופשית לתא, מעין מאגר של טקסט חומצת-גרעין, היכול להשתנות באופן חופשי במהלך הדורות.

שתי תכונות של יצורים חיים, יציבות והשתנות, המנוגדות כביכול זו לזו, מבוססות על עצם טבעו של הטקסט הגנטי. ברמת הפרט-היחיד – תא החיידק – אנו מבחינים ב'תעתוק', הנערך בקפדנות מתמירה, של תוכנה המכתיבה לא רק את פרטי התוכנית של כל מבנה מולקולרי, אלא גם את האמצעים של הוצאת התוכנית אל הפועל ואת תיאום הפעילויות של המבנים. מצד אחר, ברמה של אוכלוסיית החיידקים, או של המין בשלמותו, דומה שהטקסט של חומצת-הגרעין משתבש שוב ושוב על-ידי שגיאות העתקה, על-ידי שיכולי-אותיות של הרקומבינציה, על-ידי הוספות והחסרות. בסופו של דבר, הטקסט תמיד מתוקן. אך אין הוא מתוקן בזכותו של רצון מיסתורי כלשהו, המבקש לכפות עליו את העיצוב שלו עצמו, וגם לא על-ידי שינוי של הרצפים הנקבע על-ידי הסביבה: מסר חומצת-הגרעין איננו לומד מהניסיון. המסר מתוקן אוטומטית בתהליך של ברירה, המופעל לא על הטקסט הגנטי עצמו, אלא על האורגניזמים השלמים, או, ביתר דיוק, על אוכלוסיות אורגניזמים, כדי לסלק כל אי-סדירות. עצם רעיון הברירה טבוע בעצם טבעם של היצורים החיים, בעובדה שהם קיימים רק בה במידה שהם מתרבים. כל פרט-יחיד חדש הוא נֶשֶׂא של תוכנה חדשה – בזכות מוטציה, רקומבינציה או הוספה – ועומד מיד למבחן הרבייה. אם אורגניזם זה איננו יכול להתרבות, הוא נעלם. אם הוא יכול להתרבות טוב יותר ומהר יותר מבני סוגו, יתרון זה, קטן ככל שיהיה, מעניק מיד עידוד להכפלתו, ומכאן להמשכתה של תוכנה מסוימת זו. אם נראה, בטווח הארוך, שטקסט חומצת-הגרעין מעוצב על-ידי הסביבה, אם הלקחים של ניסיון העבר נכתבים למעשה לתוכו, הדבר מתבטא באורח עקיף בהצלחה ברבייה. אולם רק מה שקיים מתרבה. הברירה פועלת לא על אורגניזמים אפשריים אלא על אורגניזמים חיים קיימים.

שלא כמו מבנהו של הטקסט הגנטי, ההוצאה לפועל של ההוראות שהוא מכיל נתונה להשפעות יחודיות של הסביבה. אולם גם כאן, הסביבה איננה נותנת הוראות. בתהליכים מסוימים, כמו סינתזה מושרית של אנזימים, תא החיידק מגיב לנוכחותן של תרכובות יחודיות בסביבה בכך שהוא מייצר חלבונים יחודיים. עד לפני שנים מספר, דומה שברור היה שהתרכובת צריכה לכוונן בדרך כלשהי את משמעותו של המשפט הגנטי, לתת לו את חלקו בַּסֶּדֶר, לתרום למבנה הסופי של החלבון. כיום ידוע שרעיון זה שגוי: אפילו בתופעות אלו, הסביבה איננה נותנת הוראות. התרכובת היחודית משמשת גירוי פשוט; היא אך ורק מאתחלת סינתזה, שבה המנגנונים והמבנה של התוצר הסופי קבועים כבר במדויק על-ידי הטקסט של חומצת-הגרעין. המערכת מציעה רק בחירה בין שתי חלופות. ההוראה היחידה, היכולה להתקבל מהסביבה דרך החלבונים-הבקרים, היא אות 'הפעל' או אות 'הפסק'. קריאת המסר הגנטי דומה איפוא להשמעת מוסיקה מתיבת-נגינה בבית-קפה. על-ידי לחיצה על אחד הכפתורים אפשר לבחור את התקליט המבוקש מתוך אלה המצויים במכונה. אולם אין כל אפשרות לשנות את המוסיקה המוקלטת או את הביצוע. כך גם אפשר או אי-אפשר לשעתק מיקטע של הטקסט הגנטי המוכל בכרומוזום של החיידק, הכול בהתאם לאותות הכימיים המתקבלים מהסביבה; אולם האותות אינם יכולים לשנות את הרצף שלו, ואי לכך את תיפקודו. למלה הישנה-נושנה 'הסתגלות' יש איפוא שתי משמעויות שונות. מצד אחד, תופעה המופיעה אצל פרט-יחיד; בדרך כלשהי היא מבטאה את תגובתו של האורגניזם לגורם חיצוני כלשהו, אך תמיד בתוך הגבולות הנקבעים על-ידי ההוראות המוכלות בתוכנה. מצד אחר, שינויים המופיעים באוכלוסייה; זה כרוך בשינוי בתוכנה עצמה בהשפעת לחץ ברירני, המעדיף תוכנות מסוימות ברגע שהן מופיעות. אולם אם מדובר בניצול האפשרויות של תוכנה קיימת או בשינוי התוכנה, הסתגלות היא תמיד תוצאה של השפעה ברירנית ולא הוראתית של הסביבה.

*

ובכן, בדרך זו רואה הביולוגיה המולקולרית את סף השילוב, המפריד בין עולם-החי לעולם-הדומם. מובן שאנחנו רחוקים עדיין

מלדעת את כל הפרטים של מושא כה פשוט כחיידק. מתוך כאלפיים הריאקציות המתרחשות במפעל הכימי הזעיר, הוגדרו ונחקרו עד היום רק שש מאות או שבע מאות. איננו יודעים את ההרכב והמבנה של סוגים כימיים רבים המכירים זה את זה ומתאגדים לאברונים. ההרכב והמבנה של קרום התא, למשל, כמעט אינם ידועים עד כה. אמנם, כל צעד קדימה מבהיר מה רבה מורכבות הפרטים, אך הוא גם מראה כמה פשוטים העקרונות הכרוכים בדבר. התהליכים שהטבע משתמש בהם דומים מאוד לאלו המשמשים בטכנולוגיה, מעשה ידיו של האדם, אם להארכת פולימרים, העברת מידע או תיפעול מעגלי בקרה. כשחוקרים את המפעל החיידקי, מפרקים את מנגנוניו וחוקרים את המבנים שלו, אין מגלים דבר אשר, בתיאוריה לפחות, איננו מצוי כבר בתחומי הידע של הכימיה הניסויית: אין כל פער בין התנהגותן של מולקולות אי־אורגניות קטנות ובין התנהגותם של מבנים אורגניים ענקים, בין הריאקציות של הלא־חי ובין אלה של החי, בין הכימיה של המעבדה ובין הכימיה של האורגניזמים. פעילות אנזימטית מתגלה בתמיסה במבחנה ומשפיעה על מולקולות שאפשר לייצרן לעתים קרובות במעבדה; כל פעולות־הגומלין הכרוכות בדבר ידועות לפיסיקאים. לאחרונה סונתו אנזים המראה אותה פעילות קטליטית כמקבילו הטבעי. בתיאוריה, פעולה זו איננה מציגה כל קושי רציני; זה מכבר יודעים הכימאים ליצור במעבדה את הקשר המחבר שני קצוות של חומצות־אמינו בשרשרת של חלבון. אולם, מעשית, סינתזה זו היא פעולה מסובכת עד מאוד: צריך לסדר בשורה כמה מאות תתי־יחידות, אחרי־כך לחבר אותן קצה לקצה. דבר זה נעשה על־ידי הוספת תתי־יחידה אחת בכל פעם, כל פעולה דורשת סדרה של ריאקציות כימיות. החלבון נוצר במחיר כמה אלפי ריאקציות, הצריכות להתבצע בזו אחר זו בסדר קבוע. אף־על־פי שנבנו מכשירים היכולים לבצע אוטומטית כמה חלקים של העבודה בסדר המוכתב על־ידי תוכנה, סוג זה של סינתזה הוא עדיין קשה, גוזל זמן ובעל תפוקה נמוכה. אולם אפשר להתנבא בביטחון, שבקרוב ייוצרו סוגים שונים של חלבונים; לא רק מולקולות בעלות פעילות קטליטית או פעילות אחרת, אלא גם מבנים בלתי־ידועים חסרי־תפקוד; משהו בדומה לסוג של החלבון שנוצר כנראה על כדור־הארץ לפני הופעתם של היצורים החיים. מבנים אלה, חסרי

תפקיד או תכלית, יאפשרו ללמוד עבר שכמעט איננו נגיש היום לחקירה ניסויית.

קשה עוד יותר, לא עקרונית אלא מסיבות טכניות, ליצור במעבדה שרשרת ארוכה של חומצת-גרעין בעלת רצף מדויק. לא משום שהכימאים אינם יודעים איך לחבר את התתייחידות של חומצת-הגרעין זו לזו; אלא משום שהתהליכים הידועים עדיין אינם יעילים דים. גם אם כל ריאקציה מתבצעת בתפוקה של יותר מתשעים אחוז – ואנחנו עדיין רחוקים מעיילות כזאת – כמות התוצר המתקבלת אחרי אלפי הפעולות הנחוצות תהיה זעומה עד כדי אבסורד, בהשוואה לחומרי הגלם שהשתמשו בהם. ובכל זאת, אפשר לסנתז רצפים קצרים של כמה תתייחידות, ואחר-כך לחזור על הפעולה בשרשראות ארוכות. סינתזה של גן כבר נעשתה בשיטות המצרפות תהליכים כימיים אורגניים עם שימוש באנזימים חיידקיים. קרוב לוודאי שיתאפשר ליצור רצפים של חומצת-גרעין, אשר יוכלו להישתל בתא ולהעניק לו תיפקוד חדש כלשהו. מה שהיום נראה בלתי-ניתן להשגה, וכך בוודאי יהיה במשך שנים ארוכות בעתיד, הוא בריאתה, חתיכה אחר חתיכה, של שרשרת חומצת-גרעין ארוכה, עיבודה ושכלולה של תוכנה גנטית על-ידי סינתזה, אפילו תוכנה פשוטה כמו זו של וירוס. אולם אין כל סיבה אפריורית, מדוע לא יוכל הכימאי להצליח ביוזמה מעין זו, בסופו של דבר.

פיסיקאים רבים נמשכו לביולוגיה, ובמיוחד לחקר התורשה, בגלל התקווה למצוא איזה חוק חדש, שלא נתגלה עד כה בחקר החומר. ציפיותיהם לא התגשמו. מסתבר שבגלל סיבות טכניות, מבנים מורכבים יישארו מעבר ליכולת השגתה של הכימיה הניסויית עוד שנים רבות. עם זאת, אין זה בלתי-אפשרי שבעתיד יסונתזו, זה אחר זה, אלפי הסוגים הכימיים המוכלים בתא החיידק. אולם אין כל סיכוי לראות את כל התרכובות האלו מקובצות בצורה נכונה – ומתוך המבחנה יזנק חיידק מושלם. אנזימים רבים המפלמרים תתייחידות מתפקדים רק בנוכחות תווך. אחרים יכולים אך ורק להאריך מיקטעים של פולימרים קיימים, המשמשים מאתחלים. במהלך היווצרותם של אברונים מורכבים מסוימים, הכיוון הנכון

של תתי־יחידות עשוי להיקבע לעתים על־ידי נוכחותם של אברונים דומים שנוצרו כבר קודם לכן, כמו בהיווצרותם של גבישים. כל כמה שתא חיידק עשוי להיראות מגוון בהשוואה ליצורים חיים אחרים, עדיין דרוש פרק־זמן ניכר לארגון המערכת שלו. חיידק מתפקד באורח כה יעיל מפני שבמשך שני מיליארדי שנים או יותר עסקו אבותיו בכימיה הזאת, רושמים בקפדנות את המתכון של כל הצלחה. זה המקום שבו מופיעה ההפרדה בין עולם־החי לעולם־הדומם, בין ביולוגיה לפיסיקה. גופים דוממים אינם תלויים בזמן. גופים חיים קשורים בזמן באופן מוחלט. בעולם־החי אי־אפשר להפריד שום מבנה מההיסטוריה שלו.

ההיסטוריה של החיידק שלנו היא, בסופו של דבר, שלשלת רצופה של התרבויות, שהיו בה הרפתקאות, כשלונות והצלחות. בימינו יש חיידקים על־פני כדור־הארץ, מפני שבמהלך הזמן ניסו חיידקים אחרים, או אפילו צורות מגוונות יותר, להתרבות בכל מחיר פעמים רבות לאין ספור. מאחר שמגוון ההעתקה איננו פטור משגיאות, היו למערכת הזדמנויות רבות להשתנות, להתקלקל ולהשתפר. האבולוציה גבנית בזכות תאונות, אירועים מקריים, שגיאות. כל דבר העשוי להוליך מערכת אינרטיית להרס, הוא עצמו נעשה מקור לחדשנות ולמורכבות במערכת חיה. תאונה יכולה להפוך לחידוש, שגיאה להצלחה. שהרי הברירה הטבעית היא משחק עם כללים משלה. כל מה שנחשב הם השינויים המשפיעים על מספר הצאצאים. אם הם מקטינים מספר זה, הם שגיאות; אם הם מגדילים אותו, הם הצלחות. אין כל תכסיסים או תחבולות במשחק; רק ספירה זהירה של רווח והפסד. הרביה מכוונת את הסיכוי.

תא החיידק הקטן מסודר באופן שכל המערכת יכולה להתרבות בתכיפות – אפילו כל עשרים דקות. אצל חיידקים, שלא כמו אצל אורגניזמים המתרבים רק בדרך מינית, לידה איננה מאוזנת על־ידי מוות. כשתרביית חיידקים גדלה, החיידקים הבודדים אינם מתים. הם נעלמים כישויות: במקום שהיה רק אחד, מופיעים לפתע שניים. המולקולות של ה'אם' מתחלקות שווה בשווה בין 'בנותיה'. למשל, האם הכילה סליל כפול ארוך של חומצה דאוקסיריבונוקליאית המתפצל לשניים לפני התחלקות התא. כל בת מקבלת אחד

מהסלילים הכפולים הזהים האלה, שכל אחד מהם נוצר משרשרת אחת 'ישנה' ואחת 'חדשה'. אחד הקריטריונים לקבוע אם חיידיק איננו חי עוד היא אייכולתו להתרבות. אם נסתכל על אי־חיים אלה כעל מוות, הרי זה מוות מקרי. הוא תלוי לעתים קרובות בתנאי התרבות. כאשר חלק קטן מתרבות מוחלף באופן רציף על־ידי מצע טרי, תרבות זו מתקיימת במצב־גדילה מתמיד: החיידקים יוסיפו להתרבות בלי גבול.

מה שעושה פרטייחיד לארעי באוכלוסיית חיידיקים איננו איפוא מוות במובן הרגיל של המלה, אלא מיהול הכרוך בגדילה ובהכפלה. רק הארגון מוסיף להתקיים, והוא מתרבה באופן אוטומטי כל עוד יכול התא להשיג אנרגיה וחומרים מהמצע. אין שום שכל המכוון פעולות, ושום רצון המורה לפעולות להמשיך או להפסיק. קיימת רק הוצאה אל הפועל מתמדת של תוכנה שאין להפרידה ממימושה. שהרי היסודות היחידים היכולים לפענח את המסר הגנטי הם תוצרים של המסר עצמו. הטקסט הגנטי מעניק מובן רק למבנים שהוא עצמו קבע. אם כן, אין עוד סיבה להתרבות, אלא רק מחזור של אירועים, שבו תפקידו של כל רכיב תלוי בתיפקוד של הרכיבים האחרים. ארגון יכול היה להתרבות ויצורים חיים להופיע, משום שמורכבות המבנים במרחב אירעה במקרה בגלל פשטותה של מערכת־מצורפת ליניארית; וגם משום שנוסד קשר חד־משמעי בין שתי מערכות סמלים: אחת שומרת על המידע במשך הדורות, והאחרת פורשת את המבנים בכל דור. המערכת הראשונה בונה תקשורת אנכית מהורה לילד; השניה קובעת תקשורת אופקית בין רכיבי האורגניזם. הקשר בין שתי המערכות האלה מעניק להתרבות של התא לוגיקה פנימית, ששום תבונה לא בחרה בה. אולם דווקא לוגיקה זו עצמה מרחיקה את המסר הגנטי מכל שינוי הנגרם על־ידי הסביבה או על־ידי התא עצמו. רק פעילותו של החומר הגנטי, לא מבנהו, כפופה לפיקוח המתאם את רכיבי האורגניזם. אין משמעו של דבר, שהמסר של הגרעין חופשי מכל השגחה שהיא. אף־על־פי שאין היא נתונה לניטור מתוך התא, התוכנה הגנטית נתונה עדיין לבקרה מהחוץ; לא מפני שיד מיסתורית מדריכה את גורלו של כל חיידיק, אלא מפני שפרטייחיד הוא חלק מאוכלוסייה, בין אם הוא חי במבחנה, במי שלולית או במעיו של יונק. הוא מהווה איפוא רכיב

פשוט במערכת מרמה גבוהה יותר, המצייתת ללוגיקה אחרת. בתוך מערכת זו יש בקרה, המשפיעה על התוכנה הגנטית. לפעולות־הגומלין בין האוכלוסיה לסביבתה יש למעשה תוצאות המשפיעות על שחזורם של החידושים המופיעים באופן ספונטני בטקסט הגנטי. בסיכומו של דבר, בין התוכנה הגנטית לסביבה קיים אותו קשר הכרחי הנחוצ לשם הסתגלות. אולם קשר זה נוצר רק באורח עקיף דרך לולאת משוב ארוכה, המכוונת את איכות המסר לפי מספר הצאצאים. הטקסט הגנטי מסתדר בהתמדה מחדש, והמסר משתנה בלי הרף, מוכנסים בו תיקונים, והוא מסתגל לשחזורו בתנאים מגוונים ביותר, בגלל שינויים רצופים שעורכת הברירה הטבעית. מאחר שאין כל מחשבה שתכתיב לה, ואין כל דמיון שיחדש אותה, התוכנה הגנטית משתנה תוך כדי מימושה.

האינטגרון

כיום אפשר לפרש את התורשה במונחים מולקולריים, אך אין עובדה זו תכלית בפני עצמה; גם אין היא הוכחה שהביולוגיה כולה חייבת תהיה בעתיד להיות מולקולרית. בראש ובראשונה משמעה הוא, ששני הזרמים הראשיים בביולוגיה – תולדות־הטבע ופיסיו־לוגיה – שהלכו בדרכיהם הנפרדות במשך זמן רב כל־כך, כמעט התעלמו זה מזה, פועלים סוף־סוף יחד. וכך נפתרה המחלוקת הישנה־נושנה בין חסידי השילוב לחסידי הצמצום בהבחנה בין המיקרו־סקופי למקרו־סקופי שערכה הפיסיקה כבר לפני זמן רב. מצד אחד, הגיוון של עולם־החי, הרבגוניות הנפלאה של הצורות, המבנים והתכונות שמבחינים בהם ברמה המיקרו־סקופית מבוססת על המערכת־המצורפת של כמה סוגים מולקולריים, כלומר, על אמצעים פשוטים מאוד ברמה המיקרו־סקופית. מצד אחר, התהליכים המתרחשים ברמה המיקרו־סקופית במולקולות של יצורים חיים אינם מובחנים כלל מתהליכים דומים שהפיסיקה והכימיה חוקרות במערכות אינרטיות. רק ברמה המיקרו־סקופית, ברמת האורגניזמים, מופיעות תכונות מיוחדות, הנאכפות על־ידי הצורך להתרבות ולהסתגל לתנאים מסוימים. אם כן, הבעיה היא לפרש את התהליכים המשותפים ליצורים ולדברים בהתאם למעמד המיוחד שמוצאם ותכליתם של היצורים מקנה להם.

עם ידיעת אחדותם של התהליכים הפיסיקליים־הכימיים ברמה המולקולרית ניטלה מוויטליזם סיבת קיומו. למעשה, עם הופעת

התרמודינמיקה הצטמק בהתמדה ערכו האופרטיבי של מושג החיים והלך ופחת כוח ההפשטה שלו. בימינו כבר אין הביולוגים חוקרים את החיים במעבדות, וגם אין הם מנסים להגדירם. במקום זה הם מנתחים את מבנה המערכות החיות, תיפקודן וההיסטוריה שלהן. אולם בריבזמן, ידיעת התכלית של המערכות החיות משמעה, שביולוגיה כבר איננה יכולה להיחקר מבלי להתייחס כל העת ל'תוכנית' של האורגניזמים, ל'מובן' שעצם קיומם מעניק למבניהם ולתיפקודיהם – ומסתבר שזוהי עמדה שונה לחלוטין מהצמצומיות שמשלה בכיפה זמן כה רב. בתקופת הצמצומיות, כדי להיות ממש מדעי, צריך היה הניתוח לוותר על כל שיקול שמעבר למערכת הנחקרת באותה עת ומעבר לתפקידה המסוים. הקפדנות שנכפתה על התיאור דרשה שיסולק אותו יסוד של תכליתיות, שהביולוג סירב לכלול בניתוח שלו. היום, לעומת זאת, אי־אפשר להפריד את המבנה מן המשמעות שלו, לא רק באורגניזם, אלא גם בכל סדרת האירועים שהובילו את האורגניזם להיות מה שהוא. כל מערכת חיה היא התוצאה של שיווי־משקל מסוים בין יסודותיו של כל ארגון. משמעה של התלות ההדדית של יסודות אלה היא, שכל שינוי בכל נקודה שהיא משפיע על מכלול היחסים, ויביא במוקדם או במאוחר ליצירת ארגון חדש. על־ידי בידוד מערכות בעלות טבע שונה ומורכבות שונה אפשר לדעת את מרכיביהן ולהצדיק את היחסים ביניהן. אולם תהיה הרמה הנחקרת אשר תהיה – מולקולות, תאים, אורגניזמים או אוכלוסיות – הפרספקטיבה היא בהכרח היסטורית ועקרון ההסבר הוא בהכרח זה של הרצף. צריך לנתח כל מערכת חיה בשני מישורים, שני התכירוֹחב, אופקי ואנכי, שאין להפריד ביניהם אלא לשם נוחיות ההסבר. מצד אחד, צריך להבחין בעקרונות השולטים בשילוב האורגניזמים, הרכבתם, תיפקודיותם; ומצד אחר, צריך להבחין בעקרונות שהדריכו את הטרונספורמציות ואת הרצף שלהן. התיאור של מערכת חיה מחייב התייחסות ללוגיקה של הארגון שלה ולאבולוציה שלה. כיום, האלגוריתמים של עולם־החי הם המעניינים את הביולוגיה.

*

הארגון של מערכות חיות מציינת לסדרה של עקרונות שהם פיסיקליים לא פחות מביולוגיים: ברירה טבעית, אנרגיה מינימלית,

בקהר עצמית, הרכבה ב'שלבים' על־ידי שילובים רציפים של תת־ערכות. הברירה הטבעית אוכפת תכליתיות לא רק על האורגניזם השלם, אלא על כל אחד מן הרכיבים שלו. ביצור חי, כל מבנה נברר מפני שהוא ממלא תיפקוד מסוים בתוך שלם דינמי בעל יכולת להתרבות. לפיכך, ההיסטוריה והרציפות של המולקולות המרכיבות את המערכות החיות השונות הן המבדילות אותן מכל המולקולות האחרות. חלקן לא השתנו במשך מיליוני שנים: במובן מסוים, הן נשארו עותקים של המולקולות שנוצרו בזמנים קדומים. אחרות, לעומת זאת, השתנו תחת לחץ בריני כלשהו. רבות מספור אבדו לאורך הדרך; אולי רבות אף יותר הופיעו במינים חדשים, באדם למשל. אולם מעבר לדרישות הברירה, המערכות החיות, בדיוק כמו המערכות הדוממות, עדיין מציינות לחוק האנרגיה המינימלית. בין אם הן כוללות קשרים כימיים אמיתיים או לא, בין אם הן מלוות בסינתזות בין מולקולות או בקשרים פשוטים ביניהן – הריאקציות בחי פועלות תמיד באותו כיוון, בכיוון של הפחתה באנרגיה חופשית. קצבי הריאקציות האלה נקבעים תמיד על־פי אנרגיות השפעול הנדרשות על־ידי המעברים הכרוכים בדבר.

מעגלי־בקהר נותנים למערכות חיות הן את אחדותן והן את האמצעי להיות מתואמות עם חוקי התרמודינמיקה. חוקים אלה קובעים, שניתן לשנות ריאקציה כימית רק כשמדובר בשיווי־המשקל שלה או בקצב שלה. בריאקציה פשוטה, שיווי־המשקל הוא פונקציה של המולקולות המשתתפות בה.

הקטליזה רק מגבירה את הקצב על־ידי הקטנת אנרגיית השפעול הדרושה. בריאקציה אנזימטית, שמשתתפת בה ארכיטקטורה כה מורכבת כמו חלבון, תצורת החלבון היא הקובעת הן את זיקתו לסובסטרט והן את קצב הריאקציה. זיקה וקצב ניתנים לשינוי רק על־ידי שינוי תצורת החלבון. כל התיאום של התא תלוי איפוא בעיוות הגיאומטרי של חלבונים ספורים על־ידי התוצא של פעולות־הגומלין עם מטבוליטים מסוימים, הפועלים כאותות יחודיים. ביצורים רב־תאיים יש מעגלי־בקהר נוספים לשם תיאומן ושילובן של פעילויות התאים. כאן, מגעים ישירים בין תאים, כמו גם הורמונים ומערכת העצבים, משחקים את תפקידם. עדיין לא

ידוע כיצד מעגלים אלה מתפקדים. אולם קרוב לוודאי, שהורמונים ומתווכים כימיים של מערכת העצבים פועלים גם הם על-ידי עיוותם של חלבונים מסוימים בקרום או בציטופלסמה של תאים רגישים. כשהן לעצמן, לתרכובות אלה אין כל חשיבות. הן רוכשות את ערכן כאותות לתאים מסוימים רק בשל נוכחותם של חלבונים, המשמשים קולטנים, כלומר, בסופו של דבר, בגלל התוכנה הגנטית שבתאים אלה. אולם בכל המקרים, הוויסות של מערכות ביולוגיות משפיע על שיווי-המשקל של ריאקציה ועל הקצבים שלה. בכל המקרים, הוא פשוט מבטא את פעולת-הגומלין בין הרכיבים, כלומר, התכוונות הטבעות בסידור שלהם, ולפיכך במבנה שלהם.

בניה בשלבים רציפים היא העיקרון השולט בהיווצרות כל מערכת חיה, תהיה דרגת ארגונה אשר תהיה. אפילו האורגניזם הפשוט ביותר הוא כה מורכב, עד שלעולם לא היה מקבל כנראה את צורתו, ולא היה מתרבה ומתפתח, אם צריך היה לבנות את השלם תתיכה אחר תתיכה, מולקולה אחר מולקולה, כמו שיוצרים פסיפס. במקום זאת, אורגניזמים נבנים בסדרה של שילובים. יסודות דומים מקובצים יחד כדי ליצור מכלול ביניים, כמה מכלולים כאלה מתחברים יחד ויוצרים את המכלול ברמה המצויה מעליהם, וכן הלאה. כלומר, מורכבותן של מערכות היות נוצרת על-ידי צירוף של יסודות משוכללים יותר ויותר, על-ידי התאמתם זה לזה של מבנים פשוטים יותר, הכפופים להם. בכל דור אפשר ליצור מחדש מערכות אלו מהיסודות שלהן, מפגי שבכל רמה, מבנה-הביניים יציב מבחינה תרמודינמית. היצורים החיים בונים איפוא את עצמם בסדרה של 'חבילות', זו אחר זו. הם מסודרים לפי הירארכיה של יחידות בלתי-רציפות. בכל רמה, יחידות בעלות גודל מוגדר למדי ומבנה כמעט זהה מתחברות זו לזו ליצירת היחידה של הרמה מעליהן. כל אחת מהיחידות האלה, שנוצרה על-ידי שילוב של תתי-יחידות, יכולה להיקרא בשם הכללי 'אינטגרון'. אינטגרון נוצר על-ידי הקבצה של אינטגרונים מן הרמה שמתחתיו; הוא משתתף בהרכבתו של האינטגרון הנמצא ברמה שמעליו.

הירארכיה זו של אינטגרונים, עיקרון זה של קופסה המורכבת

מקופסאות, מצוי כבר ברמה המיקרוסקופית, באופן שמבני החלבון נוצרים בתוך התא. בבניית המבנים האלה אפשר להבחין, למעשה, בשלושה שלבים. בשלב הראשון, היסודות האי־אורגניים נעשים מולקולות קטנות מוגדרות, תתי־יחידות החלבון, או חומצות אמינו, בסדרה של ריאקציות אנזימטיות. היחודיות של הריאקציות תלויה בטיב החיבורים שבין האנזימים לסובסטרטים, בשיווי־המשקל שלהן. את קצבי הריאקציות מתאמת פעולת־הגומלין בין אנזימים למטבוליטים מסוימים. בשלב השני, הפולימרים מתקבצים לאורך דפוסים של חומצת־הגרעין, שם מסתדרות תתי־יחידות החלבון בשורה לפי סדר מדויק. סידור זה תלוי בחיבורים יחודיים שאינם כרוכים בקשר כימי כלשהו. רק לאחר שהסתדרו כהלכה במקומן, התתי־יחידות משורשרות זו לזו בפעולה אנזימטית. בשלב השלישי והאחרון, שרשרות החלבון מתקפלות ויוצרות מבני־על. מבני־העל הפשוטים ביותר מקובצים רק כתוצאה של יכולת ההתחברות שהמבנה שלהם מאפשר לרכיבים: די בזיקתם של היסודות זה לזה לסידור של המערכת הנוצרת ספונטנית. ואילו במבני־העל המורכבים יותר, מעין 'מרכזים' מעורבים אולי בארגונם של יסודות אחרים; מרכזים הפועלים כ'סוכנים' מבניים לשינוי ההתאמה המרחבית של היסודות האחרים, או כעין אנזימים להאצת התחברותם, או אפילו כדפוסים להעדפת סידור מסוים מבין כל אלה המותרים מבחינה תרמודינמית. אולם תמיד, הסידורים האפשריים של מבנה מאורגן תלויים באנרגיות־הקשר שבין היסודות. תמיד, הם מהווים תכונה של שיווי־המשקל של המערכת. גם אם קיימים מרכזים כאלה, היווצרותם עדיין נקבעת על־ידי פעולות־הגומלין בין היסודות. לבסוף, המבנים המורכבים ביותר נבנים בסדרה של שלבים, שבהם אפשר להשתמש במבני־ביניים לא רק כחומרים, אלא גם, אם מופיעה הזדמנות, כגורמים בהרכבת המבנה הבא. עד שזה יקרה, רק היסודות ששולבו במבנה דרושים להרכבתו. היצורים החיים נוצרים איפוא על־ידי ההקבצה הספונטנית של רכיביהם.

התכונות של מבנים אלה מזכירות במידה רבה את תכונותיהם של גבישים. זוהי אנלוגיה ישנה־נושנה, שנעשתה כבר לפני למעלה ממאתים שנה להסברת צורתם, גדילתם והתרבותם של יצורים

מאורגנים. אולם צריך היה לוותר על השוואה זו, מרגע שהתגלה מבנהו של גבישון מוצק מושלם. גביש כזה דורש, למעשה, שאותו דגם יחזור על עצמו בשלושה ממדים. זהו ארגון סדיר של אטומים מהמרכז אל שטח־הפנים. מאחר שפנים המבנה הוא בלתי־נגיש, אין לו כל תיפקוד. הגביש יכול לגדול רק על־ידי הוספת יסודות לשטח־הפנים שלו. אין הוא מתרבה. רק מאוחר יותר נעשתה הכללה למושג הגביש, והוא נעשה ישים לכל ארגון של חומר, החוזר על עצמו בשני ממדים או אפילו במימד אחד. מחלקיקים שאין להם כביכול כל מימד יכולים להיווצר באופן ספונטני סיבים, שטח־פנים הדומים לקרומים, או גופים תלת־ממדיים. מנקודה זו ואילך, האנלוגיה בין גבישים ובין מבנים של החי רוכשת מחדש ערך אופרטיבי. מה שנותן לאוסף של מושאים את תכונת ההקבצה היא הזהות בנייהם. היא לא רק מאפשרת להם ליצור מבנים גיאומטריים, אלא גם מאפשרת להם להיווצר באופן ספונטני. אולם אין כל דרך לקבוע, מהי מידת הזהות הדרושה, ואלו הבדלים במבנה יהיו נסבלים. המגבלות החלות על היווצרות גבישים תלת־ממדיים הן כנראה חמורות; נראה שהן מחמירות פחות במקרים אחרים, כך שתומצת־גרעין או תת־יחידות חלבון הן מושאים דומים דים שיסתדרו באופן גיאומטרי. לסדרה שלמה של מבנים ביולוגיים – פולימרים, קרומים ואברונים תוך־תאיים – יש איפוא לוגיקה פנימית משלהם, לוגיקה שאיננה בדיוק זו של גבישים תלת־ממדיים, אלא רק שונה במקצת. כל המבנים האלה יכולים לתפקד באופן כימי רק באמצעות שטח־הפנים שלהם.

אף־על־פי שעתה אפשר לתפוש את העקרונות הכרוכים בארגון, בהרכבה ובלוגיקה של מערכות חיות, ועל־ידי אקסטרפולציה אף אפשר להציץ במוצאן, עדיין קשה להבין את סדרת האירועים שהובילה מן האורגני אל החי. לדידו של הביולוג, החי מתחיל רק עם מה שיכול היה ליצור תוכנה גנטית. לדעתו, מושא כלשהו ראוי לשאת את השם אורגניזם רק כאשר הוא נותן נקודת־אחיזה לברירה טבעית. הוא רואה את אות החי ביכולת להתרבות, גם אם יצור פרימיטיבי עשוי להזדקק לשנים מספר כדי ליצור את הדומה לו. לעומת זאת, לדידו של הכימאי, יש שרירותיות־מה בהתוויית גבול במקום שיכולה להיות רק רציפות. בכל אורגניזם מצוי מערך של

מבנים, תיפקודים, אנוזימים, קרומים, מעגלים מטבוליים, תרכובות עתירות-אנרגיה ועוד. תהיה אשר תהיה ההתחלה של מה שקרוי מערכת חיה, אפשר להעלות על הדעת את ארגונה רק בסביבה שכבר הוכנה כראוי מראש. האבולוציה הביולוגית היא בהכרח התמשכות שאין לנתקה של תהליך ארוך של אבולוציה כימית. אפשר לנסות לשחזר במעבדה את התנאים ששררו כנראה על-פני כדור-הארץ לפני הופעתם של יצורים חיים. ובמעבדה אכן נוצרת באופן ספונטני סדרה שלמה של תרכובות אורגניות. אפילו פולימרים יכולים להופיע באקראי מתוך קשרים הנוצרים בין תתי-יחידות. למרות אי-יעילותן, הריאקציות הדרושות ליצירת המקרומולקולות האופייניות לחי הופיעו כנראה ללא זרזים ביולוגיים. עם זאת, קשה להעלות על הדעת הופעה של מערכת משולבת בשלמותה, אפילו פרימיטיבית; גם לא את מוצאו של ארגון היכול להתרבות אפילו באופן גרוע, אפילו באיטיות. שכן האורגניזם הצנוע ביותר, החיידק הפשוט ביותר, אפילו הוא, מהווה קואליציה של מולקולות שמספרן רב לאין ספור. לא יעלה על הדעת שכל החתיכות יכלו להיווצר באופן בלתי-תלוי באוקיינוס הקדמון, להיפגש במקרה ביום נאה אחד, ולהסתדר פתאום בעצמן במערכת כה מורכבת. האב הקדמון הראשון יכול היה להיות רק איזשהו סוג של גרעין, התאגדות של כמה מולקולות, העוזרות זו לזו להסתדר מחדש איכשהו. אם כן, איך התחיל כל זה? ועם מה? המסר הגנטי יכול להתרגם רק על-ידי תוצר של התרגום הנאות שלו עצמו. ללא חומצות-גראעין, לחלבונים אין כל עתיד. ללא חלבונים, חומצות-הגראעין גשארות אינרטיות. מיהי התרנגולת, ומיהי הביצה? והיכן אפשר למצוא את עקבות המבשר, או המבשר של המבשר? בפינה חבויה של כדור-הארץ, שלא נחקרה עד כה? במטאוריט? בכוכב-לכת אחר של מערכת השמש? אין ספק שגילוי, במקום זה או אחר, אם לא של צורה חדשה של חי, אזי לפחות של שרידים אורגניים מורכבים במקצת, תהיה לו חשיבות עצומה. הוא ישנה את האופן שבו אנו מתארים לעצמנו את מוצאן של התוכנות הגנטיות. אך ככל שחולף הזמן, תקווה זו הולכת ונמוגה.

באין שרידים לבדיקה, הביולוגיה נאלצת להעלות השערות. היא מנסה לארגן את הבעיות בסדרות, להפריד בין מושאי המחקר

ולנסח שאלות שניתן להשיב עליהן בדרך של ניסוי. מי מבין הפולימרים – חומצת־גרעין או חלבון – היה הראשון? מהו מקורו של הצופן הגנטי? השאלה הראשונה מעוררת הרהור בדבר האפשרות שיתקיים משהו הדומה לחי, ולו במידת־מה, ללא אחד מבין טיפוסי הפולימרים גם יחד. השאלה השניה מעוררת בעיות באבולוציה ובלוגיקה. באבולוציה, מפני שההתאמה החד־משמעית בין כל קבוצה של שלוש תת־יחידות חומצת־גרעין לתת־יחידה אחת של חלבון לא יכלה להופיע בבת־אחת. בלוגיקה, מפני שקשה לתפוש מדוע נבחרה התאמה מסוימת זו ולא אחרת; מדוע שְׁלֶשָׁה אחת של חומצת־גרעין 'משמעה' תת־יחידת חלבון מסוימת ולא אחרת. אולי היו לארגונים פרימיטיביים מגבלות־מבנה מסוימות, שאיננו יודעים עליהן דבר; ואז, ההתאמה של תצורות מולקולריות היא שהיתה צריכה להכתיב קשר זה, אם לא לכל המערכת, אזי לפחות לחלק משוויה־הערך שלה. אך שוב, אולי לא היתה שום מגבלה: ואז, רק באופן מקרי בלבד נוצרו שוויה־הערך, שהוסיפו להתקיים מאז ואילך. כי משעה שנוצרה מערכת יחסים, אי־אפשר לשנות את היחסים מבלי להסתכן באיבוד כל המשמעות של המערכת והריסת כל ערכה כמֶסֶר. צופן גנטי כמוהו כשפה: שכן, מרגע שנוסדו יחסים בין 'סימן' ל'משמעות', אפילו אם אירעו במקרה, לא ניתן לשנותם. אלה הן איפוא השאלות שהביולוגיה המולקולרית מנסה לתת להן תשובה. אך דבר איננו מצביע שהמעבר מהאורגני אל החי יוכל להיחקר אי־פעם. יתכן שלעולם לא יהיה אפשר להעריך מה היתה ההסתברות להופעת מערכת חיה על־פני כדור־הארץ. אם הצופן הגנטי הוא אוניברסלי, הרי זה כנראה משום שכל אורגניזם שהצליח לחיות עד כה הוא צאצא של אב קדמון אחד ויחיד. אולם אי־אפשר למדוד את ההסתברות של אירוע שהופיע רק פעם אחת. יש חשש שהנושא ישקע בביצה של השערות שלעולם לא יהיה אפשר לאמתן. מוצא החי גם עלול ליהפך למוקד חדש של מחלוקות מופשטות, עם אסכולות ותיאוריות שיעסקו במטפיסיקה ולא בניבוי מדעי.

אולם הביולוגיה כבר הראתה, שמאחורי המלה 'חיים' לא מסתתרת שום ישות מטפיסית. היכולת להתקבץ, היכולת ליצור מבנים ההולכים ונעשים מורכבים יותר ויותר, אפילו היכולת להתרבות,

שייכת ליסודות המרכיבים את החומר. מחלקיקים לאדם, יש סדרה שלמה של שילובים, של רמות, של אירציפיות. אך אין כל פירצה לא בהרכבם של המושאים וגם לא בריאקציות המתרחשות בהם; שום שינוי ב'מהות'. עד כדי כך, שחקר המולקולות ואברוני התא מעורר עתה עניין בקרב הפיסיקאים. פרטי המבנה מוגדרים עכשיו על-ידי קריסטלוגרפיה, אולטרה-צנטריפוגציה, תהודה מגנטית גרעינית, פלואורסצנציה וטכניקות פיסיקליות אחרות. אולם אין פירושו של דבר שהביולוגיה היתה לגספח של הפיסיקה, שהיא מהווה, כביכול, ענף זוט, העוסק במערכות מורכבות. בכל רמה של ארגון מופיעים חידושים בתכונות ובלוגיקה כאחת. התרבות איננה נעשית בכוחה של מולקולה יחידה כשהיא לעצמה. כושר זה מופיע רק עם הופעתו של האינטגרון הפשוט ביותר שראוי לכנותו חי, כלומר, התא. אולם מכאן ואילך משתנים כללי המשחק. על אינטגרון מהרמה הגבוהה – אוכלוסיית התא – הברירה הטבעית אוכפת מגבלות חדשות ומציעה אפשרויות חדשות. בדרך זו, ומבלי שתחדלנה לציית לעקרונות השולטים במערכות האינטריות, המערכות החיות נשמעות גם לתופעות שאין להן משמעות ברמה נמוכה יותר. אמנם אי-אפשר לצמצם את הביולוגיה לפיסיקה, אך גם אין היא יכולה בלעדיה.

כל מושא הנחקר על-ידי הביולוגיה מייצג מערכת של מערכות. בהיותו בעצמו חלק של מערכת מסדר גבוה יותר, הוא מציית לפעמים לכללים שלא ניתן להסיק אותם אך ורק על-ידי ניתוח המערכת. כלומר, צריך לבחון כל רמת ארגון ביחס לרמות הסמוכות. אי-אפשר להבין איך פועל מכשיר טלוויזיה מבלי לדעת מצד אחד כיצד פועלים טרנזיסטורים, ומצד אחר מהו הקשר בין משךר למקלט. אולם בכל רמה של שילוב, מתגלים אופיינים חדשים. כפי שכבר ציינו הפיסיקאים בתחילת המאה ה-20, האירציפיות איננה דורשת רק אמצעי תצפית שונים; היא גם משנה את טבע התופעות, ואפילו את החוקים שעליהם הן מושתתות. לעתים קרובות מאוד, מושגים וטכניקות, המיושמים ברמה נתונה, אינם מתפקדים ברמה מעליה או ברמה מתחתיה. מה שמאחד את הרמות השונות של הארגון הביולוגי היא הלוגיקה המתאימה להתרבות. מה שמבדיל

אותן זו מזו הם אמצעי התקשורת, מעגלי־הבקרה, הלוגיקה הפנימית המתאימה לכל מערכת.

*

הכול מסכימים, שיש כיוון באבולוציה. למרות שגיאות, דרכים ללא מוצא והתחלות שגויות, נעשתה דרך מסוימת במשך למעלה משני מיליארדי שנים. יחד עם זאת, קשה לתאר את המהלך שאכפה ברירה טבעית על המקריות. המלים 'קידמה', 'התקדמות' ו'שיפור' אינן מתאימות. הן מעלות על הדעת יתר על המידה סדירות, תכלית, אנתרופומורפיזם. הקריטריונים שלהן אינם מוגדרים כהלכה. אם קריטריון אחד הוא הסתגלות לשם הישרדות, אזי מסתבר שהחיידק אשריכיה קולי הסתגל יפה לסביבתו ממש כשם שהאדם הסתגל לסביבתו. המלים 'סיבוך' או 'מורכבות' גם הן אינן טובות יותר. יש סיבוכים שאינם גובים כל מחיר; סיבוכים אחרים, לעומת זאת, מונעים כל אפשרות של אבולוציה גוספת בגלל התמחות־יתר. מה שאולי אופייני יותר מכול לאבולוציה היא הנטייה לגמישות בהוצאה אל הפועל של התוכנה הגנטית; זוהי 'פתיחות', המאפשרת לאורגניזם להרחיב באופן קבוע את קשריו עם סביבתו, וכך להרחיב את טווח פעולתו. ביצור כה פשוט כחיידק, התוכנה מבוצעת בקפידה רבה. היא 'סגורה' במובן זה שהאורגניזם יכול לקבל מסביבתו רק מידע. מוגבל מאוד ויכול להגיב למידע זה רק בדרך קבועה מאוד. כל מה שחיידק תופש היא נוכחותן של תרכובות מסוימות בנוזל התרבית או העדרן בו. התגובה היחידה שלו היא ייצור או אי־ייצור של החלבונים המתאימים. תפישה וריאקציות מצטמצמות תמיד לחלופה: כן או לא. 'הצלחה' באבולוציה מובילה להגברת היכולת לתפוש וגם להגברת היכולת להגיב. כדי שאורגניזם יתמיון, כדי שיהיה תלוי פחות בסביבתו, כדי שירחיב את שחלופיו עם העולם החיצוני, חייבת להיות התפתחות לא רק של המבנים הקושרים את האורגניזם לסביבתו, אלא גם בפעולות־הגומלין המתאמות את רכיביו. ברמה המקרוסקופית, האבולוציה תלויה איפוא בבניה של מערכות תקשורת חדשות, הן בתוך האורגניזם והן בין האורגניזם לסביבתו

המיידית. ברמה המיקרוסקופית, הדבר מתבטא בשינויים, איכותיים וכמותיים, בתוכנות הגנטיות.

זמן ואריתמטיקה גם יחד שוללים את הדעה, שאבולוציה נובעת באופן בלעדי מרצף של מיקרו־אירועים, ממוטציות, שכל אחת מהן מופיעה במקרה. כדי שגלגל המזל יעצור, פעם אחר פעם, תת־יחידה אחר תת־יחידה, בכל אחת ממאות אלפי שרשרות החלבון הדרושות להרכבת גופו של יונק, צריך היה הרבה יותר ממשך הזמן שהוקצה למערכת השמש. רק באורגניזמים פשוטים מאוד יכולה וריאציות להופיע בשלבים קטנים עצמאיים. רק בחיידקים, מהירות הגדילה וגודל האוכלוסיות מאפשרים לאורגניזמים לחכות להופעתה של מוטציה כדי להסתגל. אבולוציה היתה אפשרית רק משום שהמערכות הגנטיות עצמן הלכו והתפתחו. ככל שאורגניזמים הולכים ונעשים מורכבים יותר, כן רבייתם הולכת ונעשית מורכבת יותר. סדרה שלמה של מנגנונים מופיעים, המבוססים תמיד על אקראיות, העוזרים לסידור מחדש של התוכנות ומאלצים אותן להשתנות: פיזור התוכנה הגנטית לכמה כרומוזומים; נוכחותם של שני עותקים של כל כרומוזום בכל תא, ולא רק עותק אחד; פאזות המתחלפות לסירוגין של ערכת כרומוזומים אחת או שתי ערכות כרומוזומים במהלך מחזור החיים; ההתפלגות העצמאית של הכרומוזומים; הרקומבינציה על־ידי שבירה ואיחוי של כרומוזומים הומולוגיים, וכן הלאה. אולם שתי ההמצאות החשובות ביותר הן מיניות ומוות.

המיניות הופיעה כנראה מוקדם באבולוציה. תחילה היא היתה מעין עזר לרבייה, משהו מיותר: דבר איננו מחייב חיידק להשתמש במיניות כדי להיכפל. הכורח להזדקק למיניות כאמצעי רבייה הוא המשנה באופן קיצוני את המערכת הגנטית ואת האפשרויות להופעת וריאציות. משעה שמיניות נעשית הכרחית, כל תוכנה גנטית איננה נוצרת עוד על־ידי העתקה מדויקת של תוכנה יחידה, אלא על־ידי סידור מחדש של שתי תוכנות שונות. תוכנה גנטית כבר איננה איפוא תכונה בלעדית של קו־צאצאים אחד. היא שייכת לכלל, לקבוצה של פרטים־יחידים המתקשרים זה עם זה באופן מיני. כך נוצרת מעין קרן גנטית משותפת, שכל דור מושך ממנה כדי

ליצור תוכנות חדשות. קרן משותפת זו, אוכלוסיה זו המאוחדת על-ידי מיניות, יוצרת את אחדות האבולוציה. במקום הזהות, הנאכפת על-ידי ההתרבות הקפדנית של התוכנה, המיניות מציעה עתה את הרבגוניות, הנוצרת על-ידי סידור מחדש של התוכנות בכל דור. רבגוניות זו היא כה רבה, עד שחופץ מתאומים זהים, שום פרטייחיד איננו דומה בדיוק לאחיו. המיניות מחייבת את התוכנות להקיף את כל האפשרויות של המערכת המצורפת הגנטית. לפיכך היא כופה שינוי. כדי להשתכנע שהמיניות ממלאה תפקיד כזה באבולוציה, שהיא עצמה מושא של האבולוציה, הפתוח לעידון מתמיד, די אם נחשוב על דקויות התחכום, הטקסים והסיבוכים המלווים את הפעילות המינית בקרב היצורים העילאיים.

מוות הוא התנאי ההכרחי השני לעצם אפשרותה של אבולוציה. אין מדובר במוות מסיבות חיזוניות, כתוצאה של תאונה כלשהי; אלא מוות הנכפה מבפנים, כורח המוכתב, כבר מהביצית, על-ידי התוכנה הגנטית עצמה. שהרי האבולוציה היא תוצאה של מאבק בין מה שהיה ובין מה שיהיה, בין השמרני למהפכני, בין הזהות שברביה ובין החדשנות שבווריאציות. באורגניזמים המתרבים בדרך של התחלקות, די במיהולו של פרטייחיד, הנגרם על-ידי מהירות הגדילה, כדי למחוק את העבר. ואילו באורגניזמים רב-תאיים, שיש בהם התמיינות לקו של תאי גוף (סומה) ולקו של תאי גבט, שיש בהם רביה מינית, הפרטים היחידים צריכים להיעלם. זוהי תוצאה של פעולת שני כוחות מנוגדים: שיווי-משקל בין יעילות מינית, על העיבור, הטיפול והלמידה הכרוכים בה, ובין היעלמותו של הדור שהשלים את תפקידו בהתרבות. התיאום בין שני הפרמטרים האלה על-ידי התוצא של הברירה הטבעית הוא הקובע מהו משך-הזמן המרבי שיחיה כל מין שהוא. כל מערכת האבולוציה, לפחות אצל בעלי-החיים, מבוססת על שיווי-משקל זה. אין להניח בידי המקרה את קביעת גבולות החיים. הם כתובים כבר בתוכנה, אשר מרגע הפריית הביצית קובעת את גורלו הגנטי של הפרט-היחיד. מנגנון ההזדקנות עדיין איננו ידוע לנו. התיאוריה המקובלת ביותר היום טוענת שהזיקנה היא תוצאה של הצטברות טעויות, אם בתוכנות הגנטיות המצויות בתאי הגוף או בדרך שתוכנות אלו באות לידי ביטוי, כלומר, בחלבונים המיוצרים

על-ידי התאים. לפי תיאוריה זו, התא יכול להתמודד עם מספר מסוים של טעויות. אולם מרגע שעבר נקודה זו, הוא נידון למוות. עם הזמן, הצטברות טעויות במספר רב של תאים גורמת לכליה הבלתי-נמנעת של האורגניזם. עצם הדרך שבה יוצאת התוכנה אל הפועל היא הקובעת איפוא את אורך החיים. יהיה המוות תוצאה של מה שיהיה, הוא חלק בלתי-נפרד מהמערכת שנבררה בעולם בעלי-החיים והאבולוציה שלו. בימינו תולים תקוות רבות במה שקרוי 'הנדסה ביולוגית': ריפוי של נגעים רבים, סרטן, מחלות לב, מחלות נפש; החלפת איברים שונים בשתלים או בחלקים מלאכותיים; ריפוי של כשלים מסוימים בגיל גבוה; תיקון של קלקולים גנטיים מסוימים; אפילו הפסקה זמנית של חיים פעילים, כדי שיוכלו לשוב ולתפקד לאחר מכן. אולם יש רק סיכוי קטן ביותר שאי-פעם אפשר יהיה להאריך את החיים מעבר לגבול מסוים. קשה ליישב את המגבלות שמכתיבה האבולוציה עם החלום הישן-נושן בדבר חיי נצח.

מצבור האמצעים העומדים לרשות הגנטיקה מעדיף בעיקר שינויים באיכותה, לא בכמותה, של התוכנה. למעשה, האבולוציה מתבטאת, קודם-כול, במורכבות רבה יותר. חיידק מייצג תרגום של רצף חומצת-גרעין, שאורכה כמילימטר אחד והיא מכילה כעשרים מיליון סימנים. אדם הוא התוצאה של רצף חומצת-גרעין אחרת, שאורכה כשני מטרים והיא מכילה כמה מיליארדי סימנים. ככל שהארגון מסובך יותר, כן ארוכה התוכנה. אבולוציה מתאפשרת בזכות היחס שנוצר בין מבנה האורגניזם במרחב ובין הרצף הליניארי של המסר הגנטי. מורכבות השילוב מבוטאת על-ידי פשטות התוספת. מנגנוני הגנטיקה הידועים אמנם מעדיפים וריאציות של התוכנה, אך כמעט לעולם אינם מספקים לה כל תוספות. יש טעויות העתקה מסוימות, המכפילות קטעים מסוימים של המסר, המיקטעים הגנטיים שווירוסים יכולים להעביר או אפילו כרומוזומים עודפים. אולם תהליכים אלה אינם יעילים ביותר. קשה לראות כיצד די היה במנגנונים אלה כדי לגרום כמה מהשלבים העיקריים באבולוציה: השינוי בארגון התאי מהצורה הפשוטה, או ה'פרוקאריוטית', של חיידקים, לצורה המורכבת, או ה'אוקאריוטית', של שמרים ושל אורגניזמים עילאיים יותר; או

המעבר ממצב של חד־תאיות למצב של רב־תאיות; או הופעת החולייתנים. למעשה, כל אחד מהשלבים האלה תואם לגידול חשוב למדי שחל בכמות חומצת־הגרעין. יתכן שגידול פתאומי זה יכול היה להופיע רק על־ידי ניצול מרבי של אירוע מקרי יוצא מגדר הרגיל, כגון, טעות ברביה שסיפקה כרומוזומים נוספים; או אפילו תהליך יוצא מגדר הרגיל, כגון סימביוזה של אורגניזמים או איחוי של תוכנות גנטיות ממינים מובחנים. העובדה שסימביוזות אכן יכולות לקחת חלק באבולוציה מוכחת היום על־ידי טבעם של 'מיטוכונדריה', אותם אברונים האחראים ליצירת אנרגיה בתאים מורכבים; לפי כל הקריטריונים הביוכימיים, אברונים אלה נושאים חותם של חיידקים. יש להם אפילו רצף חומצת־גרעין משלהם, שאיננה תלויה בכרומוזומים של התא המאחסן אותם. הם, קרוב לוודאי, שרידים של חיידקים שהתחברו בזמן מן הזמנים עם אורגניזם אחר ליצירת האב הקדמון של התאים שלנו. באשר לאיתוים של תוכנות גנטיות, הם ידועים בצמחים, אך לא בבעלי־חיים, שמגנון ביטחון מגן עליהם מפני התוצאים של 'ההזדווגויות המתועבות', שהיו נושא כה חביב בעת העתיקה ובימי־הביניים. אולם תאים ממינים שונים אוחו לאחרונה בתרבויות במעבדה, כגון של אדם ושל עכבר. כל תא כזה מכיל גם את תוכנת האדם וגם את תוכנת העכבר, ותאי־כלאיים אלה מתרבים באופן מושלם. מה שהזדווגויות לא־נורמליות בין מינים שונים אינן יכולות להשיג, ניתן להשיג בכל זאת בדרכים אחרות. אילו יכלו מיפגשים מעין אלה לתת תוצאות, ולו רק במקרים יוצאים מגדר הרגיל, די היה בכך כדי לספק את ההזדמנות לשינויים מרחיקי־לכת. מעשית, אין דבר המוכיח שתאונות כאלה מופיעות בטבע; תיאורטית, אין הן בלתי־אפשריות. אין סדירות בהרחבות של התוכנה. יש שינויים פתאומיים, גידול בלתי־צפוי, הפחתה בלתי־מוסברת, בלי כל קשר למורכבות האורגניזם. נדרשים אירועים יוצאי־דופן עד מאוד להתאמת הגידול בתוכנה למיקצב האבולוציה. כל זה מראה מה רבה האשליה בכל תקווה שנוכל לאמוד בימינו את משך האבולוציה או להעריך את ההסתברויות שלה. ביום מן הימים יוכלו אולי לחשב בעזרת מחשבים מה היה הסיכוי להופעת האדם על־פני כדור־הארץ.

הרחבה של התוכנה נגרמת על-ידי הנטיה להגדיל את מספר פעולות-הגומלין בין האורגניזם לסביבתו, שהיא תופעה אופיינית של האבולוציה. יש דרכים רבות שבהן יכול אורגניזם להגדיל את מספר שיחלופיו עם סביבתו המיידית. כבר החד-תאיים מצליחים בכך. מכלול האברונים המומחים שלהם מראים דרגת מורכבות מפתיעה בתא יחיד. אולם יש גבול למספרם ולגודלם של מבנים, המתיישבים עם ההתרבות. מעבר לסף מסוים, גידול במספר התאים, התמיינותם והתמחותם הופכים להיות חסכוניים. בעוד תאים מסוימים עסוקים בהזנה, אחרים יכולים לעסוק בתפישה, תנועה או שילוב. התגוונות התאים והתמחותם משמע, שחרור כל אחד מהם ממגבלות הנאכפות על-ידי הכורח להצליח בביצוע כל הריאקציות של האורגניזם. משמע, לאפשר לכל תא לעשות פחות, אך לעשות זאת טוב יותר, בתנאי שהפעילויות מתואמות. כדי להתמחות, התאים חייבים לתקשר זה עם זה.

תאים יכולים לתקשר ביניהם בכמה דרכים: על-ידי מגע ישיר, או בתיווכם של מערכת העצבים וההורמונים. עד עתה ידוע רק מעט על טבען של פעולות-הגומלין המולקולריות הלוקחות חלק במעגלי-בקרה מעין אלה. למעשה, אנחנו מתחילים 'להבין' את התא, אך לא את הרקמות או האיברים. דבר איננו ידוע על הלוגיקה של המערכת המנטרת את הוצאתן אל הפועל של תוכנות מסובכות, כמו ההתפתחות של יונק. היווצרותו של אדם מביצית היא פלא של דייקנות וקפדנות. כיצד יכולים להופיע מתא אחד מיליארדי תאים בקווי-יחוס מתמחים, בסדר מושלם בזמן ובמרחב, הוא דבר שמעבר להשגתו של כוח הדמיון. במהלך ההתפתחות העוברית מיתרגמות ומוצאות אל הפועל בהדרגה ההוראות המוכללות בכרומוזומים שבביצית, וקובעות מתי והיכן ייווצרו אלפי הסוגים המולקולריים המהווים את גוף הבוגר. כל תוכנית הגדילה, כל סדרת הפעולות הצריכות להתבצע, הסדר והאתר של הסינתזות והתיאום ביניהן – כולם כתובים במסר של חומצת-הגרעין. ובהוצאתה אל הפועל של התוכנית יש רק מעט כשלונות: דיוקה של מערכת יכול להימדד לפי נדירותן של הפלות ושל הופעת מפלצות.

במהלך ההתפתחות, כל תא מקבל ערכה שלמה של כרומוזומים.

אולם התאים השונים מייצרים, בהתאם להתמחותם, טיפוסים שונים של שליחים ושל חלבונים. אף-על-פי שכל תא מכיל את התוכנה בשלמותה, הוא מתרגם רק חלק ממנה ומוציא אל הפועל רק הוראות מסוימות. יש איפוא מעקובת מדויקת של אירועים כימיים, שבמהלכה משתנה עצם ביטויים של הגנים בעת התמיינות התאים. באמצעות משחק-הגומלין של מעגלי-בקרה, קטעים של המסר משופעלים או מעוכבים בכל קורתא. מעגלי-הבקרה האלה לא רק מורכבים יותר באורגניזמים רב-תאיים מאשר בחיידקים, אלא גם עונים על דרישות אחרות. ראשית, משום שבאורגניזמים אלה חייבות להיות מערכות היכולות לשפעל באופן דיפרנציאלי ערכות של גנים באופן קבוע, במקום באופן הפיך. שנית, משום שמציאת גן אחד בין מיליון, ולא אחד בין אלף, מצריכה מנגנון משוכלל יותר, כמו בחירה רציפה בתת-ערכות. ולבסוף, משום שחיידק או תא באורגניזם רב-תאי פועלים בתנאים שונים לגמרי. החיידק צריך לקיים את שיווי-המשקל התיפקודי שלו בעודו מסתגל לסביבות שונות. התא גם הוא חייב לשמור על מצב מדויק של שיווי-משקל; אולם נוסף לכך הוא חייב לתאם את הפעילויות שלו עם התאים הנמצאים בשכנותו. רק בדרך זו יכול האיבר למלא את תיפקודיו, אשר בתורם כפופים לאורגניזם בשלמותו.

בסופו של דבר, הלוגיקה של האורגניזם, האינדיבידואליות שלו, התכלית שלו, הן המנטרות תמיד את רכיביו ואת מערכות התקשורת שלו. אולם ברשת המתאמת מכלול כה מסובך של פעילויות כימיות, יונק למשל, יש הזדמנויות רבות לטעויות או למהלכים שגויים. לחלקם אין כל חשיבות; לאחרים תוצאות מכריעות. התחלקות תאים, למשל, מנוטרת על-ידי האורגניזם. התחלקות התאים מהירה בתחילה, במהלך התפתחות העובר, נפסקת כליל כשהאורגניזם מגיע לבגרות, ומתחדשת רק בתגובה לפציעה. התוכנה הגנטית לא רק מכותיבה את התוכנית של התחלקות התאים, אלא גם קובעת לה גבול. נראה שרשת מתאמת זו מצרפת שני מיני מעגלים: אחד ישיר, המתחבר על-ידי מגע ממשי בין התאים עצמם; השני עקיף, המתחבר על-ידי הורמונים מתווכים. אולם בכל מקרה, התא מקבל את האותות באמצעות קולטנים יחודיים המצויים על שטח-הפנים שלו. אם ינותק הקולטן, אם לא

יועבר האות, תופרע פעילותו של אחד המעגלים המבטיחים שהמולקולות והתאים יפעלו יחד כחברה. וכך עשוי תא להגיע למצב של אנרכיה: אם לא ישמע את האותות המגבילים את גדילתו, כבר אין הוא חבר בקהילה. הוא עשוי לפלוש לרקמות שכנות ולגרום להופעת גידול. בזכות רעיון התוכנה הגנטית איבדו המחלוקות הוותיקות בדבר מקורו של הסרטן הרבה מחשיבותן. אם הנגע מתחיל בגרעין או בציטופלסמה, אם הוא תוצאה של מוטציה סומטית, של גזכחות וירוס או של פגם במעגל – כל דבר המונע את קליטתו של אות יכול להוציא את התא אל מחוץ לחוקי הקהילה. להבין סרטן, משמע, להשיג גישה ללוגיקה של המערכת, האוכפת על תאים את מגבלות האורגניזם.

כל הסיבוכים האלה, הנגרמים על-ידי הכפלת התאים ועל-ידי התמיינותם, נקבעים על-ידי הגידול שחל במספר השיחלופים בין האורגניזם לסביבתו. בריפוי פצע לאתר פציעה, או בחידוש גף לאחר קטיעה, כבר באלה יש משום כיוון תגובותיו של האורגניזם. גמישות רבה יותר של התוכנה מאפשרת להדוף טיפוסים מסוימים של תוקפנות. אולם במהלך האבולוציה התפתחו יותר מכול האמצעים לאיסופו של מידע מבחוץ, לעיבודו ולכיווןן הריאקציות של אורגניזם בהתאם לו. כל הפתרונות האפשריים נוסו תחת הבקרה של הברירה הטבעית. יש אורגניזמים החשים את סביבתם, אחרים שומעים אותה, רואים אותה, או מריחים אותה. האמצעים להגיב לגירויים והטווח של בחירת התגובות גדלים במקביל. שכן, לא די לרכוש רשמים מעטים פה ושם, אלא צריכה להתקיים גם היכולת לשלב אותם ולהסיק מסקנות. למשל, יש יתרון ברגישות לאור. יתרון זה הוא כה גדול, עד שהעין 'הומצאה' פעמים מספר במהלך האבולוציה: העין המורכבת של החרקים; עין העדשה, שהופיעה באופן בלתי-תלוי בשלוש הזדמנויות לפחות: ברכיכות מסוימות, בעכבישנים ובחולייתנים הקדומים ביותר. איזו תועלת יש במכשיר מדויק, היכול להגדיר צורה, להעריך מרחק, ולקבוע את כיוון התנועה, אם לא כדי לאתר טורף או טרף ולהגיב בהתאם? לשם כך חשוב שיהיו האמצעים לשילובם של האותות המתקבלים, להשוואתם עם צורות שנרשמו ב'זיכרון', להבחנה בין ידיד לאויב, לשחיה, לריצה ולמעוף; בקיצור, ל'בחירת' התגובה.

אמצעי תפישה, תגובה או החלטה חייבים להתפתח בהרמוניה.

הגידול שחל במספר השיחלופים של אורגניזם עם סביבתו מבוסס על התפתחות מערכת העצבים. אולם רמת הידע על מערכת זו בימינו נמצאת כמעט באותה רמה שהיה הידע על התורשה במאה ה-19. אנחנו יודעים קצת על תכונות השמליות וביוכימיות מסוימות של העצבים; אולם אנחנו יודעים מעט מאוד על יחודיות החיבורים או ארגונה והרכבתה של רשת־התקשורת. איך מוצפן המידע, איך הוא מועבר, נרשם ומפוענח? איזו לוגיקה מונחת ביסוד תיפקודיות המוח, הזיכרון או הלמידה? בתחומים אלה אנחנו עדיין כמעט בורים לגמרי. אולם נראה שעל עובדה אחת אין עוררין: האנטומיה של מערכת העצבים נקבעת בדרך כלשהי על־ידי התורשה. המוח הוא כמו איברים אחרים: המבנה שלו נקבע עד הפרט האחרון על־ידי התוכנה הגנטית. במוטנטים רבים של העכבר, שינוי של גן מסוים אחד גורם הן לאנומליה בהתנהגות והן לנגע יחודי במוח. באורגניזמים מסוימים, במהלך הרגורציה של עצבים שנחתכו, הנתיב שהסיבים בוחרים בו, יצירת החיבורים, הרכבת המעגלים – בקיצור, כל ארגונה של רשת־התקשורת, מתבצעים בהתאם לתוכנית המקורית. למעשה, במוחם של יונקים מצויים מרכזים מוגדרים לא רק לקליטת תחושות שונות ולהפעלת שרירים שונים, אלא גם לבקרת שינה, או חלימה, או תשומת־לב, ואפילו ליצירת מצבי היפעלות. למשל, אצל החולדה יש מרכז 'העגשה' ומרכז 'הנאה': חולדה שהושתלו בה אלקטרודות במקומות המתאימים, וניתנו לה האמצעים להפעלת מרכז הנאה זה, יכולה לרצות את עצמה עד שהיא מתמוטטת מאפיסת כוחות מוחלטת! אולם עדיין איננו יודעים כיצד המעגלים הנרכשים 'מתלבשים' על רשת־התקשורת של התורשה, וגם לא כיצד מותאמים הטבוע והנרכש זה לזה. בימינו כבר אין סבורים ששני האחרונים מנוגדים זה לזה, אלא שהם משלימים זה את זה. לדעת האתולוגים, כאשר התנהגות כרוכה בחוויה נרכשת, היא תלויה בתוכנה הגנטית. למידה מתמקמת במסגרת שנקבעה על־ידי התורשה. אין ספק שבקרב נוכל לנתח את המנגנון המולקולרי של סינפסות, את הקשר בין תאי העצב, את אחדות הקשר האנטומי שעליו מבוסס כל סידורה של רשת העצבים. אנחנו יכולים להיות

בטוחים כי בעיני הביוכימאי, הריאקציות האופייניות של פעילות המוח ייראו רגילות ממש כמו הריאקציות במערכת העיכול. אולם דבר שונה לגמרי הוא תיאורם של רגש, החלטה, זיכרון, מצפון לאינקי במונחים של הפיסיקה והכימיה. דבר איננו מראה לנו, שאי־פעם יהיה דבר זה אפשרי, לא רק בגלל המורכבות, אלא גם מפני שמאז גדל אנחנו יודעים שלא די במערכת לוגית כדי לתאר אותה עצמה.

עם התפתחות מערכת העצבים, עם למידה וזיכרון, חלה התרופפות־מה בחומריתה של התורשה. בתוכנה הגנטית, המצויה בתשתית האופיינים של אורגניזם מסובך למדי, יש חלק סגור, היכול לבוא לידי ביטוי רק בדרך קבועה מוחלטת, וחלק אחר, פתוח, המאפשר לפרטייחיד תופש תגובה מסוים. מצד אחד, התוכנה מכתיבה באופן קשיח מבנים, תיפקודים וסגולות; מצד אחר, היא רק קובעת פוטנציאלים, נורמות ומסגרות. כאן היא פוקדת; שם היא מרשה. ככל שעולה חשיבותו של מה שנרכש, כן משתנה התנהגותו של הפרטי־היחיד. דבר זה מתגלה בדרכים השונות שציפורים נעזרות בהן להכרת בנות דמותן. אצל חלקן, כמו אצל הקוקיה, זיהוי המין נקבע בדרך המוכתבת בקשיחות בתוכנה הגנטית. היא מזהה את בנות דמותה אך ורק על־ידי ראיית צורות ותנועות. הקוקיה הצעירה, שגדלה בקן של הוריה המאמצים, כמו סיתרים או סיבכים, מצטרפת לחברת קוקיות אחרות ברגע שהיא נעשית עצמאית, גם אם לא ראתה ולו אף אחת מהן בחייה. אצל אווזים, לעומת זאת, הזיהוי הרבה יותר גמיש. הוא פועל בתיווכו של מנגנון שהאתולוגים מכנים אותו 'החתמה'. אחרי הבקיעה, האווזון הצעיר הולך אחרי האובייקט הראשון שהוא רואה נע מולו ואת קולו הוא שומע. בדרך־כלל, האווזון הולך בעקבות אמו האמיתית. אולם אם במקרה זהו אורגניזם אחר, למשל קונרד לורנץ, אזי האווזון רואה את קונרד לורנץ כאמו, והולך בעקבותיו לכל מקום. התוכנה הגנטית קובעת איפוא צורה במקרה אחד, ויכולת לקבל חותם של צורה במקרה אחר. בעולם־החי יש דוגמאות רבות מסוג זה. החשיבות ההולכת וגדלה של החלק הפתוח בתוכנה היא הנותנת כיוון לאבולוציה. יחד עם היכולת להגיב לגירויים, גדל גם מספרן של דרגות־החופש שיש לאורגניזם לבחירת תגובותיו. אצל

האדם, מספר התגובות האפשריות נעשה כה גדול, עד שאפשר לדבר על 'דצון חופשי', היקר כל-כך בעיני הפילוסופים. אולם לעולם אין הגמישות ללא גבולות. גם כאשר התוכנה נותנת לאורגניזם רק יכולת, למשל ללמוד, היא אוכפת מגבלות על מה שיכול להילמד, מתי תיעשה הלמידה, ובאילו תנאים. התוכנה הגנטית של האדם נותנת לו כושר לשפה. היא נותנת לו יכולת ללמוד, להבין ולדבר בכל שפה שהיא. אולם כדי לממש את הפוטנציאל הזה, האדם חייב בכל זאת להיות בסביבה מעודדת בשלב מסוים של התפתחותו. אחרי גיל מסוים, אם נשללו מילד דיבור, טיפול ואהבת אם למשך זמן רב מדי, לעולם לא ילמד לדבר. אותן מגבלות קיימות גם לגבי הזיכרון. יש גבולות לכמות המידע היכול להירשם, למשך-הזמן שאפשר לאחסנו, וליכולת לשלוף אותו מתי שרוצים. אולם גבול זה שבין קשיחות לגמישות בתוכנה כמעט לא נחקר עד כה.

כאשר מספר השיחלופים הולך וגדל במהלך האבולוציה, מופיעות מערכות תקשורת חדשות שכבר אינן פועלות בתוך האורגניזם, אלא בין אורגניזמים. בדרך זו מתבססות רשתות של יחסים בין פרטים-יחידים השייכים לאותו מין. בתחילה, מערכות תקשורת אלו היו קשורות ישירות עם תכלית הרבייה. בלעדיהן, מיניות כמעט לא היתה מביאה תועלת. כל עוד אין היא הכרחית לרבייה ונשארת רק כתיפקוד עזר, אין דבר שיעודד את איחוד הזוויגים. אין כל 'משיכה מינית' בין חיידקים. המפגשים נעשים בעת התנגשויות מקריות בין פרטים-יחידים מזוויגים מנוגדים. כך גם הדבר באורגניזמים ירודים מסוימים, אשר בהיותם הרמפרודיטים הם משתמשים במגע מיני רק לפעמים. אך ככל שגדלה עצמאותו של האורגניזם, ככל שמיניות הופכת לשיטת הרבייה היחידה, פרטים-יחידים מזוויג אחד חייבים למצוא דרך לאתר פרטים-יחידים מהזוויג האחר. לפיכך מופיעות מערכות תקשורת לטווח ארוך, הקשורות באופן ברירני את הזוויגים המנוגדים של אותו מין. אלה הם בדרך-כלל אותות יחודיים, המשודרים על-ידי זוויג אחד ונקלטים על-ידי האחר. יש חרקים המשתמשים באותות ריח: הם יוצרים חומר גדיף אשר נקלט, מזהה ומפורש על-ידי חרקים אחרים, שהתוכנה הגנטית שלהם ציידה אותם בקולטן

הרגיש למבנה מולקולרי זה. חרקים אחרים משתמשים באותות קול: רק הזכרים שרים. דגים וציפורים משתמשים באותות ויזואליים: אחד הזוויגים, בדרך-כלל הזכר, נושא ציוד מסובך של צורות, צבעים וקישוטים זוהרים, המספקים גירויים יחודיים לזוויג הנגדי. אותות ויזואליים אלה, הקשורים על-ידי הורמונים לכימיה של האורגניזם, משפעלים את כל אותו חלק של ההתנהגות הקשור ברבייה. זה מאתחל את רצף הפעילויות המובילות להזדווגות, לבניית קן, לדגירה, וכן הלאה. גם כאן, המעקובת השלמה של פעולות, פולחנים וטקסים שיבוצעו רשומה במסר הגנטי. המראה של הזוויג הנגדי משחק תפקיד של אות פשוט. הוא רק מאתחל את הוצאתה אל הפועל של תוכנית רבייה מוכנה-מראש.

מסתבר שמערכות אותות אלה נבררו כדי לעודד את הרבייה. אולם בכל זאת הן משמשות אמצעי-תקשורת בין פרטים-יחידים של אותו מין. הן מאפשרות את היווצרותם של האינטגרונים מסדר גבוה מזה של האורגניזם היחיד. אולם חוץ מאשר אצל היונקים, רק לעתים נדירות מוסיף להתקיים שילוב מעבר להתחברות הזמנית של זוג, כלומר, יחידת הרבייה. דבר זה יוצא-דופן בקרב קבוצות של בעלי-חיים שהתנהגותם הקבוצתית מתואמת, כמו עדת דגים או להקת ציפורים בתקופת הנדידה. אך בעיקר הוא יוצא דופן בקרב חרקים מסוימים – נמלים, טרמיטים או דבורים – היוצרים אינטגרונים אמיתיים, שהם מעבר ומעל לפרט-היחיד. ההשוואה הישנה-נושנה בין אורגניזם לחברה מתגלמת בקן-הנמלים, בגבעת-הטרמיטים או בכורת-הדבורים. ובכל זאת, כל אחד מהמבנים האלה הוא בראש ובראשונה יחידת רבייה. המלכה והזכרים ממלאים את תפקידם של תאי המין, הפועלות את תפקידיהם של תאי הגוף (תאי הסומה). גם במקרים אלה, האחדות של המערכות האלה נקבעת בקפדנות על-ידי התוכנות הגנטיות, המנטרות לא רק את המורפולוגיה והפיסיולוגיה של כל טיפוס, אלא גם כוללות את טבעו ואת סדרת הפעולות שהוא צריך לבצע. כאשר התוכנה נפתחת, כאשר נוסדת מערכת תקשורת חדשה כמו ריקוד הדבורים, הדבר נעשה כדי להעביר מידע שהוא הכרחי לתיפקוד אחד של המערכת: חיפוש אחר מזון.

המבנה של המסר הגנטי הוא המכתיב איפוא את המבנה של חברות בעלי־החיים. אולם אצל היונקים הולכת ומתמתנת נוקשותה של תוכנת התורשה. איברי החישה מתעדנים, חל גידול באמצעי הפעולה, במיוחד עם יכולת הלפיתה. היכולת לשלב גדלה בד בבד עם המוח. אפשר אפילו לראות הופעה של תכונה חדשה: היכולת להשתחרר מהיצמדות לאובייקטים ולהעמיד מעין מסנן בין האורגניזם לסביבתו: היכולת לסַמֵל. בהדרגה, האות הופך לסימן. אפילו מכרסם יכול ללמוד להבחין בין משולש לריבוע או לעיגול, ולקשור צורה עם חיפוש אחר מזון. חתול יכול ללמוד לספור גירויים. אף־על־פי ששימפנזה איננו יכול לדבר בעזרת קנה־הנשימה שלו, נראה שהוא יכול ללמוד יסודות מסוימים של שפת־צופן של מחוות, שחירשים־אילמים משתמשים בה לשם תקשורת. בדרך זו השימפנזה מצליח להכיר סימנים מסוימים, לפרשם ולחקותם, ואפילו לצרף כמה מהם בקבוצות ולהרכיב 'משפטים' קצרים ולהביע את עצמו. האיזור הקטן של המוח, המפקח על מחוות ודיבור, לא התפתח איפוא ב'מכה אחת', בקפיצה פתאומית. גם האדם לא נעשה אדם בסדרה יחידה של שלבים עוקבים, בשרשרת רציפה. אלא הוא נעשה אדם על־ידי פסיפס של שינויים, שבו כל איבר, כל מערכת איברים, כל קבוצה של תיפקודים, התפתחו בדרך משלהם ובקצב משלהם: חיים עובריים ארוכים והתפתחות איטית; הליכה על שתי רגליים ושחרור הגפיים הקדמיות; היווצרות היד והשימוש בכלים; הרחבת נפח המוח וכושר הדיבור – כל אלה מובילים לא רק לאוטונומיה רבה יותר בהקשר לסביבה, אלא גם למערכות חדשות של תקשורת, של בקרה, של זיכרון, המתפקדות ברמה גבוהה יותר מזו של האורגניזם. כל התנאים מתקיימים איפוא להופעתם של שילובים חדשים, שבהם התיאום בין היסודות איננו תלוי עוד בפעולת־הגומלין בין מולקולות, אלא בשיחלוף של מסרים מוצפנים. בדרך זו נוצרת הירארכיה חדשה של אינטגרונים. מארגון משפחתי לחברה מודרנית, מקבוצה אתנית לקואליציה של אומות, סדרה שלמה של אינטגרונים מבוססים על מיגוון צפנים: תרבותיים, מוסריים, חברתיים, פוליטיים, כלכליים, צבאיים ודתיים. ההיסטוריה של האנושות היא, פחות או יותר, ההיסטוריה של האינטגרונים האלה והדרך שבה הם נוצרו והשתנו. גם שם מופיעה הנטיה לשילוב רב יותר, המתאפשר על־ידי התפתחותם של

אמצעי תקשורת חדשים. כל עוד הוגבלה לדיבור, העברת המידע היתה מוגבלת במרחב ובזמן. עם הכתיבה יכלה התקשורת להשתחרר ממגבלת הזמן, ונסיון העבר של כל פרטי־יחיד יכול היה להיאגר בזיכרון המשותף. עם האלקטרוניקה, עם האמצעים לשמירת תמונה וקול, והאפשרות להעבירם לכל נקודה על־פני כדור־הארץ באופן מיידי, נעלמו כל המגבלות של זמן ומרחב.

באינטגרונים התרבותיים והחברתיים מופיעים מושאים חדשים, המתפקדים בהתאם לעקרונות שאינם ידועים ברמות נמוכות יותר. המושגים דמוקרטיה, רכוש ושכר אינם משמעותיים כלל לתא או לאורגניזם, ממש כשם שהמושגים רביה וברירה טבעית אינם משמעותיים למולקולה בודדת. פירושו של דבר, שהביולוגיה איננה במיטבה בחקר האדם, ממש כשם שהפיסיקה איננה במיטבה בחקר התא. בתחום זה אין הביולוגיה מייצגת אלא גישה אחת בין גישות אחרות. מאז הופעתה של תיאוריית האבולוציה, סוציולוגים – החל בהברט ספנסר – ניסו תכופות לפרש את הווריאציות של אינטגרונים חברתיים או תרבותיים ואת פעולת־הגומלין שלהם באמצעות מודלים שהם אך ורק ביולוגיים. מאחר שהמנגנונים השולטים בהעברת מידע מצייתים לעקרונות מסוימים, אפשר לראות את הנחלת התרבות במהלך הדורות כמעין מערכת גנטית שניה ה'מולבשת' על־גבי התורשה. ואז קשה, במיוחד לביולוגים, לעמוד בפני הפיתוי להשוות את התהליכים הפועלים בשתי המערכות, ואף לערוך אנלוגיות ביניהם; להשוות את הדרכים שרעיונות ומוטציות צצים ועולים; להשוות, בדרך הניגוד, את החידוש שבשינוי עם שמרנות העותק; להסביר את היעלמותן של חברות או תרבויות, כמו זו של מינים, על־ידי דרכים־ללא־מוצא בגלל התמחות־יתר של האבולוציה. אפשר לערוך את ההקבלה הזאת אף לפרטי־הפרטים. אם כן, רביה מצויה במרכזן של שתי המערכות, בצפנים של תרבות וחברות כמו במבנה ותכונות של אורגניזמים: האיחוי של תרבויות הוא כמו האיחוי של תאי מין; האוניברסיטה משחקת בחברה את התפקיד של קו־הגבט במין; רעיונות פולשים לשכל כשם שווירוסים פולשים לתאים; הם מתרבים ונבררים בגלל היתרונות שהם מעניקים לקבוצה. בקצרה, הווריאציות של חברות ושל תרבויות, בדומה לזו של המינים,

מתבססת על אבולוציה. לא נשאר איפוא אלא להגדיר את הקריטריונים של הברירה. הבעיה היא שאיש עדיין לא הצליח בכך.

המושאים היוצרים אינטגרונים תרבותיים וחברתיים – עם הצפנים, הבקורות ופעולות-הגומלין שלהם – נשגבים מהסכמות-ההסברתיות של הביולוגיה. גם הפעם כרוך בהם שילוב של רכיבים שהם עצמם משולבים. אולם, אף-על-פי שיש שלבים נוספים ואי-דציפיות של תופעות ומושגים, אין ניתוק מוחלט מרמות הביולוגיה. מושאי התצפית מעוגנים זה בתוך זה. הפיסיולוגיה, למשל, חוקרת בנפרד את התיפקודים של האורגניזם ושל המנגנונים המתאמים אותם. ברמה שמעל לפיסיולוגיה, מדע ההתנהגות מתעלם מהתהליכים הפנימיים, כדי שיוכל לתפוש את התגובה המלאה של האורגניזם לסביבתו. וברמה גבוהה עוד יותר, הדינמיקה של אוכלוסיות והסוציולוגיה מתעלמות מהתנהגותם של פרטים-יחידים וחוקרות את התנהגותן של קבוצות שלמות. ביום מן הימים צריך יהיה לצרף יחדיו את רמות התצפית השונות, כדי שיתייחסו זו לזו. שוב, אין כל תקווה לתפוש את המערכת מבלי להבין את התכונות של יסודותיה. משמע שמחקר האדם והחברות שבני-אדם חיים בהן אמנם אינו יכול להצטמצם לביולוגיה בלבד, אך הוא זקוק לביולוגיה, כשם שביולוגיה זקוקה לפיסיקה. אי-אפשר להסביר טרנספורמציות תרבותיות וחברתיות על-ידי הברירה הרעיונית. אך גם אי-אפשר לשכוח שהאורגניזם האנושי הוא תוצר של הברירה הטבעית. מבין כל האורגניזמים, לאדם יש תוכנה גנטית שהיא הפתוחה והגמישה ביותר. אולם מהי מידת גמישותה? באיזו מידה מכתובים הגנים את ההתנהגות? אילו מגבלות מציבה התורשה על השכל האנושי? נראה שמגבלות כאלה קיימות בכמה רמות; אך היכן צריך להתוות את הגבולות? לפי הבלשנות המודרנית, יש דקדוק בסיסי, המשותף לכל השפות; אחידות זו עשויה לשקף מסגרת שהתורשה מכתובה לארגון של המוח. לדעת הנאורופיסיולוגים, החלימה היא תיפקוד הכרחי לא רק אצל האדם, אלא אצל כל היונקים; היא מנוטרת על-ידי מרכז הממוקם באיזור מוגדר היטב במוח. לדעת האתולוגים, תוקפנות היא צורה של התנהגות שנבררה במהלך האבולוציה. מאחר שהיתה קיימת כבר אצל רוב החולייתנים, היא נתנה יתרון ברירני לאדם כשחי בקבוצות

קטנות והתחרה כל העת על מזון, נשים וכוח. כיום, לא הברירה הטבעית היא המשחקת את התפקיד הראשי בטרנספורמציות של האדם, כך לפחות בחברות מסוימות. אלא התרבות, שהיא יעילה יותר, מהירה יותר, אך גם עדכנית מאוד. לפיכך, מקורם של היבטים רבים בהתנהגות האדם בימינו מתגלה ביתרון בריני מסוים, שניתן למין בשעת הופעתו. צריך להכניס אופייניים רבים של טבע האדם לתוך המסגרת שנקבעה על-ידי עשרים ושלושה זוגות הכרומוזומים המהווים את המורשת המשותפת של האדם. אך מהי מידת נוקשותה של מסגרת זו? אילו הגבלות אוכפת התוכנה הגנטית על הפלסטיות של השכל האנושי?

עם צבירת הידע היה האדם לתוצר הראשון של האבולוציה היכול לנטר את האבולוציה. לא רק את האבולוציה של אחרים, על-ידי העדפתם של מינים המעניינים אותו וסילוקם של אחרים המטרודים אותו, אלא גם את האבולוציה שלו עצמו. ביום מן הימים אולי אפשר יהיה להתערב בהוצאתה אל הפועל של התוכנה הגנטית, או אפילו במבנה שלה, כדי לתקן אי-אלו תקלות ולהגניב פנימה הוראות נוספות. אולי גם אפשר יהיה ליצור, על-פי רצונו ובמספר עותקים רבים ככל הנדרש, העתק מדויק של פרטייחיד, למשל, פוליטיקאי, אמן, מלכת יופי או ספורטאי. אין שום דבר שימנע יישום מידי של תהליכי הברירה שמשתמשים בהם בטיפוח סוסי מירוץ, עכברי מעבדה או פרות מגיבות חלב – גם לטיפוח בני-האדם. אולם נראה שרצוי לדעת תחילה מהם הגורמים הגנטיים הכרוכים באיכויות כה מורכבות כמו מקוריות, יופי או סיבולת פיסית. ומעל לכול, צריך להגיע לכלל הסכמה מהם הקריטריונים של הבחירה. אולם נושא זה איננו יותר עניינה של הביולוגיה בלבד.

יש עקיבות בתיאורי המדע, אחדות בהסבריו, המשקפת אחדות הנמצאת בתשתית הישויות והעקרונות הכרוכים בדבר. בכל רמה שהיא, מושאי הניתוח הם תמיד ארגונים, מערכות. כל אחד מאלה משמש חומר לרמה שמעליו. אפילו האטום, שבעבר נחשב לישות שאיננה ניתנת לצמצום, הוא עתה מערכת. והפיסיקאים עדיין אינם יכולים לומר, האם הקטנה מבין הישויות הידועות כיום גם היא ארגון, אם לאו. המלה 'אבולוציה' מתארת את השינויים

המתרחשים בין מערכות. שהרי, מה שמתפתח איננו חומר המתמזג עם אנרגיה ליצירת שלם אחד קבוע. אלא זהו ארגון, יחידת המופע היכולה להתחבר תמיד עם הדומות לה כדי להשתלב למערכת, שהיא נשלטת על-ידיה. ללא תכונה זו, היה היקום משעמם: אוקיינוס של חלקיקים זהים, אינרטיים, המתעלמים זה מזה; משהו בדומה לסלעים העתיקים ביותר על-פני כדור-הארץ, שהמולקולות שלהם והיחסים ביניהם לא השתנו במשך מיליארדי שנים.

השילוב הוא המשנה את איכות הדברים. שהרי ארגון ניהן לעתים קרובות בתכונות שאינן קיימות ברמה שמתחתיו. אפשר להסביר תכונות אלו על-ידי תכונות הרכיבים, אך אין להקיש מהם. פירושו של דבר, שיש רק הסתברות מסוימת להופעת אינטגרון מסוים. כל התחזיות בדבר קיומו יכולות להיות סטטיסטיות בלבד. דבר זה ישים באותה מידה לגבי היווצרותם של יצורים ודברים; לגבי הרכבו של תא, של אורגניזם, או של אוכלוסיה, כמו גם של מולקולה, אבן או סערה. כיום, אחדות ההסבר מבוססת איפוא על אקראיות. אולם באורגניזמים, תוצאי האקראיות מתוקנים מיד על-ידי דרישות ההסתגלות, הרבייה והברירה הטבעית; ולפיכך יש לפנינו פרדוקס. בעולם-הדומם אפשר לנבא במדויק באופן סטטיסטי מהם הסיכויים להופעתם של אירועים. ולעומת זאת, ביצורים חיים, הקשורים באופן בל יינתק להיסטוריה שפרטיה לא ייוודעו לעולם, הסטיות שמציגה הברירה הטבעית מונעות כל אפשרות של ניבוי. איך אפשר היה לנבא את הופעתן והתפתחותן של צורות חיות מסוימות ולא של אחרות? איך אפשר היה לחזות מראש, שבעידן המזוזואיקון יבוא סופם הפתאומי של הזוחלים הגדולים והופעתם של היונקים?

בסופו של דבר, כל הארגונים, כל המערכות וכל ההירארכיות חבים את עצם אפשרות קיומם לתכונות של האטומים שתוארו על-ידי חוקי האלקטרומגנטיות של מקסוול. יתכן שאפשריות עקיבויות אחרות בתיאורים. אולם המדע סגור ומסוגר במערכת ההסבר שלו עצמו, ואיננו יכול להימלט ממנה. היום, העולם הוא מסרים, צפנים ומידע. ומחר, איזה ניתוח יפרק את המושאים שלנו, כדי לשחזרם במרחב חדש? איזו בובה רוסית חדשה תופיע?

הערות

הקדמה – התוכנה

- C. Bernard, *Leçon sur les phénomènes de la vie*, Paris, 1878, vol. 1, .1
pp. 50-51

המבנה הנראה

- Ambroise Paré, *Œuvres*, Paris, 1841, vol. III, p. 43 .1
Fernel, *De Abditis Rerum Causis*, I,1; *Opera*, Geneva, 1637, pp. .2
483-484
J.B. Porta, *Phytognomonica*, I,8, Rouen, 1650, p. 14 .3
P. Belon, *La nature et diversité des poissons*, Paris, 1555, p. 87 .4
Paracelsus, *Les cinq livres de Auréole Philippe Théophraste de* .5
Hohenheim, Prologue, French translation in *Œuvres médicales*,
Paris, 1968, p. 194
Paracelsus, *Le Livre Paragranum*, *ibid.*, pp. 95-96 .6
Cesalpino, *De Plantis Libri XVI*, I,14, Florence, 1583, p. 28 .7
Cardan, *Les Livres intitulés de la subtilité*, French translation, Paris, .8
1584, VIII, p. 196b
צסלפינו (הערה 7, לעיל), עמ' 3. .9
Fernel, *Ambiani Physiologiae Libri*, IV, 1; *Opera*, p. 101 .10
Fernel, *De Abditis Rerum Causis*, II,7; *Opera*, p. 590 .11
Montaigne, *Essays*, I,8, tr. E.J. Trechmann, Oxford University Press, .12
1927, vol. I, p. 26
פרנל, דה אבדיטיס, I,8; אופרה, עמ' 538. .13
קורדנוס (הערה 8, לעיל), IX, עמ' 235ב. .14
Paré, *De la génération de l'homme*, Preface; *Œuvres*, vol. II, p. 634 .15

16. פרנל, דה אנדיטיס, I, 7; אופרה, עמ' 535.
17. פארה, גורציה, X; כתבים, כרך ב, עמ' 651.
18. פרנל, דה אנדיטיס, I, 3; אופרה, עמ' 491.
19. פארה, כתבים, כרך 2, עמ' 638.
20. מונטיין, מסות, II, 37; כרך ב, עמ' 214.
21. פרצלזוס (הערה 5, לעיל), עמ' 222.
22. Fernel, *Ambiani Physiologiae Libri*, VII; *Opera*, p. 239.
23. Paré, *Des Monstres et Prodiges*, XVI; *Œuvres*, vol. III, p. 34.
24. פארה, שם, XX; כתבים, כרך 3, עמ' 44.
25. פארה, כתבים, כרך 3, הקדמה, עמ' 1.
26. מונטיין, מסות, II, 30; כרך 2, עמ' 161.
27. Descartes, *Rules for the Direction of the Mind*, XII; *The Philosophical Works of Descartes*, tr. E.S. Haldane & G.R.T. Ross, Cambridge University Press, 1931, p. 35 (להלן: כתבים פילוסופיים).
28. Galileo, *Il Saggiatore, Opere*, Florence, 1890-1909, vol. IV, p. 232.
29. דקרט, כללים (הערה 27, לעיל), X; כתבים פילוסופיים, עמ' 31.
30. Leibniz, *New Essays Concerning Human Understanding*, IV, xii, tr. Alfred Gideon Langley, Chicago and London, The Open Court Publishing Company, 1916, p. 526.
31. Descartes, *Principles of Philosophy*, IV, 205, עמ' 301.
32. Descartes, *Meditations*, I; *Discourses on Methods and Meditations*, tr. F.E. Sutcliff, Penguin Books, 1968, p. 100.
33. גלילאו (הערה 28, לעיל), עמ' 232.
34. Condillac, *Essai sur l'origine des connaissances humaines*, IV, 1, Amsterdam, 1746, vol. I, p. 179.
35. דקרט, עקרונות הפילוסופיה, IV, 203; כתבים פילוסופיים, עמ' 300.
36. Buffon, *De la manière d'étudier et de traiter l'histoire naturelle; Œuvres complètes*, Paris, 1774-1779, 17 vol. I, p. 19.
37. C. Bonnet, *Contemplation de la nature*, Amsterdam, 1766, p. 25; *Œuvres complètes*, Neuchâtel, 1781, vol. VII, p. 42.
38. שם, עמ' 37; כל כתבי, כרך 7, עמ' 81-79.
39. Galileo, *Discours concernant deux sciences nouvelles*, French translation, Paris, 1970, p. 107.
40. Borelli, *De Motu animalium*, CCIV, Rome, 1685, p. 243.
41. Harvey, *On the Motion of the Heart and the Blood in Animals*, 1628, ch. xvii; *The Works of W. Harvey*, Sydenham Society, London, 1847 (reprinted 1965), pp. 78-80; Everyman edition, Dent, 1963, pp. 101-105.
42. Descartes, *Treatise on Man; Selections*, ed. Ralph M. Eaton, New York, Charles Scribner's Sons, 1927, p. 354.

- .43 שם.
- Descartes, *Discourse on Method and the Meditations*, Penguin Books, 1968 .44
- Réaumur, *Des Gâteaux de cire. Mémoires pour servir...; Morceaux choisis*, Paris, 1939, pp. 101-102 .45
- Fontenelle, *Histoire de l'Académie Royale*, 1739, p. 35 .46
- Buffon, *Discours sur la nature des animaux; Œuvres complètes* (a), vol. V, pp. 380-381 .47
- Hartsoeker, *Cours de physique*, The Hague, 1730, vol. VII, p. 71 .48
- Stahl, *Recherche sur la différence entre machine et organisme*, XXXIV; *Œuvres médico-philosophiques et pratiques*, Paris, 1859-1863, vol. II, p. 289 .49
- Hartsoeker, *Suite des éclaircissements sur les conjectures physiques*, Amsterdam, 1712, p. 55 .50
- Geoffroy, *Table des différents rapports observés en Chymie: Traité de la Matière médicale*, Paris, 1743, vol. I, p. 18 .51
- Lavoisier, *Traité de chimie*, Paris, 2nd edition, 1793, p. vi .52
- .53 שם, עמ' xix-xviii
- .54 שם, עמ' xx
- .55 שם, עמ' xxi
- Réaumur, *Second mémoire sur la digestion*, Mém. Acad. Sc. Paris, 1752; קטעים נבחרים, עמ' 202 .56
- Lavoisier, *Premier mémoire sur la respiration des animaux* (Seguin et Lavoisier); *Œuvres*, Paris, 1862, vol. II, p. 691 .57
- .58 לבואזיה, שם, עמ' 697
- .59 שם, עמ' 700
- Tournefort, *Elémens de botanique*, Paris, 1694, vol. I, p. 4 .60
- Linnaeus, *The Elements of Botany (Philosophia Botanica)*, London, 1775, p. 338 .61
- Tournefort, *Introduction à la botanique*, in 'Tournefort', Museum National d'Histoire Naturelle, Paris, 1957, p. 284 .62
- .63 ליניאוס, יסודות הבוטניקה, עמ' 335
- .64 טורנפור, הקדמה לבוטניקה, כרך 1, חלק 2, עמ' 47
- .65 ליניאוס, יסודות הבוטניקה, עמ' 364
- Buffon, *Les Pingouins et les Manchots*, *Œuvres complètes*, 1853-1857 .66
- . [hereafter (b)], vol. VIII, p. 589 להלן: בופן, כל כתבי (ב).
- Robinet, *De la nature*, Amsterdam, 1766, vol. IV, p. 5 .67
- Bonnet, *Contemplation de la nature*, II,10; *Œuvres*, vol. VII, p. 52 .68
- .69 בונה, כתבים, כרך 7, עמ' 51
- Adanson, *Familles des plantes*, Paris, 1763, p. clxiv .70
- .71 בופן (הערה 36, לעיל); כל כתבי (א), כרך 1, עמ' 54

- .72. טורנפור, יסודות הבוטניקה, עמ' 13.
- Fontenelle, *Œuvres*, Paris, 1767, vol. V, pp. 219-220 .73
- .74. ליניאוס, יסודות הבוטניקה, עמ' 307.
- .75. טורנפור, הקדמה לבוטניקה, עמ' 284.
- .76. ליניאוס, יסודות הבוטניקה, עמ' 231-230.
- .77. שם, עמ' 232.
- .78. טורנפור, הקדמה לבוטניקה, עמ' 289.
- .79. אדנסון, משפחות הצמחים, עמ' clviii.
- .80. בופון (הערה 36, לעיל); כל כתבי (א), כרך 1, עמ' 88.
- .81. טורנפור, יסודות הבוטניקה, עמ' 1.
- .82. ליניאוס, יסודות הבוטניקה, עמ' 264.
- .83. שם, עמ' 304.
- .84. טורנפור, הקדמה לבוטניקה, עמ' 297.
- .85. ליניאוס, יסודות הבוטניקה, עמ' 305.
- .86. John Ray, *Historia Plantarum*, London, 1686, vol. I, ch. xx, pp. 40-41.
- .87. Buffon, *Histoire Naturelle des animaux; Œuvres complètes* (a), vol. III, p. 15.
- .88. ליניאוס, יסודות הבוטניקה, עמ' 232.
- .89. Buffon, *De la nature; Œuvres complètes* (b), vol. III, p. 414.
- .90. Harvey, *On the Generation of Animals*, 1651, ch. xvii; *The Works of W. Harvey*, Sydenham Society, London, 1847 (reprinted 1965), *On Parturition*, p. 575.
- .91. שם, עמ' 577.
- .92. Descartes, *Primæ Cognationes; Œuvres*, Paris, 1897-1913, vol. XI, p. 506.
- .93. Descartes, *Formation de l'animal; Œuvres*, vol. IX, p. 277.
- .94. Malebranche, *Entretiens sur la métaphysique, sur la religion et sur la mort*, Paris, 1711, vol. II, pp. 14-15.
- .95. Redi, *Experimenta circa Generationem Insectorum; Opera*, Amsterdam, 1686, vol. I, pp. 30-31.
- .96. שם, עמ' 18-17.
- .97. Steno, *Elementorum Myologiae Specimen*, Florence, 1667, p. 117.
- .98. Regnier de Graaf, *Traité des parties des femmes qui servent à la génération*, Warsaw, 1701, Preface, pp. ii-iii.
- .99. Leeuwenhoek, Letter to Grew, 25.4.1679; *Arcana naturae*, Leyden, 1696, part II, p. ii.
100. מלבראנש (הערה 94, לעיל), כרך 2, עמ' 13.
101. Hartsoecker, *Essay de dioptrique*, ch. X, 89, Paris, 1694, p. 229.
102. שם, עמ' 228.
103. Leeuwenhoek, Letter to Leibniz; *Epistoles physiologicae*, Delft, 1719, p. 294.

104. הרטסוקר (הערה 101, לעיל), עמ' 230.
- Geoffroy, *Traité de la Matière médicale*, vol. I, p. 95. 105
- Malebranche, *Recherche de la Vérité*, Paris, 1700, vol. I, p. 48. 106
- Perrault, *De la mécanique des Animaux; Œuvres diverses de physique et de mécanique*, Leyden, 1721, p. 485. 107
108. מלבראנש, חיפוש אחר האמת, כרך 1, עמ' 48-47.
- Swammerdam, *Histoire générale des Insects*, Utrecht, 1682, p. 48. 109
110. מלבראנש, חיפוש אחר האמת, כרך 1, עמ' 48.
111. הרטסוקר (הערה 101, לעיל), עמ' 231.
112. מלבראנש, חיפוש אחר האמת, כרך 1, עמ' 200.
- Leibniz, *Theodicy*, Routledge & Kegan Paul, 1951, p. 172. 113
- Fontenelle, *Lettres galantes; Œuvres*, vol. I, pp. 322-323. 114
- Haller, cited in Bonnet, *Considération sur les corps organisés; Œuvres*, vol. VI, p. 443. 115
- Bonnet, *Contemplation de la nature; Œuvres*, Amsterdam, 1766, vol. VIII, p. 130. 116
- Bonnet, *Insectologie; Œuvres*, vol. I, p. 230. 117
- Bonnet, *Contemplation de la nature; Œuvres*, vol. VIII, p. 71. 118
- Réaumur, *Mémoire sur les grenouilles; Morceaux choisis*, p. 250. 119
- שם, עמ' 247. 120
- Spallanzani, *Expériences pour servir à l'histoire de la génération*, Geneva, 1785, XIII, p. 13. 121
- שם, CXIX, עמ' 129-128. 122
- שם, CLXIX, עמ' 201. 123
- שם, CLII, עמ' 184. 124
125. בופון, תולדות בעלי-החיים (הערה 87, לעיל); כל כתבי (א), כרך 3, עמ' 231-232.
- Réaumur, *Mémoires Acad. Sc.*, Paris, 1712, p. 235. 126
- Maupertuis, *Vénus Physics, Œuvres*, Lyons, 1768, vol. II, p. 70. 127
- Bonnet, *Lettres. Œuvres*, vol. XII, p. 382. 128
- Réaumur, *Art de faire éclore les Poulets*, 2nd edition, Paris, 1751, vol. II, p. 340. 129
- שם, עמ' 367-366. 130
- Koelreuter, cited in R.C. Olby, *Origins of Mendelism*, Constable, 1966, p. 154. 131
- Maupertuis, *Lettres. Œuvres*, vol. II, pp. 307-308. 132
133. ראומיר (הערה 129, לעיל), עמ' 377 ואילך.
- Bonnet, *Corps organisés, CCCLV; Œuvres*, vol. VI, p. 479. 134
135. מופרטואי (הערה 132, לעיל), עמ' 310-309.
- Newton, *Optiks*, G. Bell & Sons, 1931, p. 1. 136
- Réaumur, *Travaux de l'Academie des Sciences*, 1712, p. 226. 137

הלוגיקה של החי

138. בופון, תולדות בעלי-החיים; כל כתבי (א), כרך 3, עמ' 25.
 139. בונה, כתבים, כרך 15, עמ' 356.
 140. מופרטואי, מכתבים. כתבים, כרך 2, עמ' 418.
 141. בופון, תולדות בעלי-החיים; כל כתבי (א), כרך 3, עמ' 48.

ארגון

- Haller, *Éléments de physiologie*, part I, ch. I, x, French translation, Amsterdam, 1769, p. 3 .1
 2. שם, עמ' 2.
 Bonnet, *Palingénésie philosophique*, IX,1; *Œuvres*, vol. XV, p. 350 .3
 4. בופון, תולדות בעלי-החיים; כל כתבי (א), כרך 3, עמ' 28-27.
 5. Maupertuis, *Vénus physique*; *Œuvres*, vol. II, p. 120
 6. בופון, תולדות בעלי-החיים; כל כתבי (א), כרך 3, עמ' 35-34.
 7. מופרטואי, כתבים, כרך 2, עמ' 121.
 8. בונה, גופים מאורגנים; כתבים, כרך 6, עמ' 391-390.
 9. מופרטואי, כתבים, כרך 2, עמ' 122-121.
 10. Maupertuis, *Système de la Nature*, XIX; *Œuvres*, vol. II, p. 149
 11. שם, XXXIII; כתבים, כרך 2, עמ' 159-158.
 12. בופון, כל כתבי (א), כרך 3, עמ' 49-48.
 13. שם, עמ' 51.
 14. שם, עמ' 51.
 15. שם, עמ' 61.
 16. Buffon, *Le Cerf*; *Œuvres complètes* (b), vol. II, p. 521
 17. מופרטואי, כתבים, כרך 2, עמ' 132.
 18. בופון, כל כתבי (א), כרך 3, עמ' 450.
 19. Buffon, *Introduction à l'histoire des minéraux*; *Œuvres complètes* (a), vol. VI, p. 24
 20. Buffon, *Nomenclature des Singes*; *Œuvres complètes* (b), vol. IV, p. 15
 21. Lamarck, *Philosophie zoologique*, Paris, 1873, vol. I, p. 62 (להלן: פילוסופיה של הזואולוגיה).
 22. Goethe, *Introduction générale à l'anatomie comparée*; *Œuvres d'histoire naturelle*, French translation, Paris, undated, p. 26
 23. de Jussieu, *Principes de la méthode naturelle des végétaux*, from the *Dictionnaire des sciences naturelles*, Paris, 1824, p. 27
 24. Lamarck, *La Flore française*, Paris, 1778, vol. I. p. xcvi
 25. לאמארק, פילוסופיה של הזואולוגיה, כרך 1, עמ' 102.
 26. שם, עמ' 63.
 27. שם, עמ' 119.

- Lamarck, *Histoire naturelle des animaux sans vertèbres*, 1815-1822, .28
vol. I, pp. 130-131
- .29. לאמארק, פילוסופיה של הזואולוגיה, כרך 1, עמ' 189.
- .30. לאמארק, הצומח בצרפת, כרך 1, עמ' 1-2.
- .31. לאמארק, פילוסופיה של הזואולוגיה, כרך 1, עמ' 106.
- .32. לאמארק, חסרי-חוליות, כרך 1, עמ' 49-50.
- Kant, *The Critique of Judgement*, tr. James Creed Meredith, Oxford .33
University Press, 1952, part II, pp. 17-18
- .34. גתה, הקדמה לאנטומיה משווה, עמ' 30.
- .35. קאנט, ביקורת השיפוט, עמ' 22.
- Bichat, *Recherches physiologiques sur la vie et la mort*, 1810, p. 97 .36
- Cuvier, *Leçons d'anatomie comparée*, 2nd edition, Paris, 1835, vol. .37
I, p. 2
- .38. בישה, מחקרים בפיסיוולוגיה, עמ' 1.
- .39. קוביה, אנטומיה משווה, כרך 1, עמ' 4.
- .40. גתה, הקדמה לאנטומיה משווה, עמ' 19.
- Liebig, *Chimie organique appliquée à la physiologie animale*, French .41
translation, Paris, 1842, p. 209
- .42. קוביה, אנטומיה משווה, כרך 1, עמ' 4.
- Bichat, *Anatomie générale*, 2nd edition, Paris, 1818, vol. I, p. 17 .43
- Cabanis, *Rapport du physique et du moral*, Paris, 1830, vol. II, p. 256 .44
- .45. ליביג, כימיה אורגנית, הקדמה, עמ' ix.
- .46. שם, עמ' 171.
- Wöhler, cited in J. Loeb, *The Dynamics of Living Matter*, Columbia .47
University Press, 1906, New York, p. 7
- .48. ליביג, כימיה אורגנית, עמ' 202-203.
- .49. שם, עמ' 215.
- .50. שם, עמ' 218.
- .51. שם, עמ' 112.
- Liebig, *Chimie appliquée à la physiologie végétale*, French .52
translation, Paris, 1844, p. 365
- Berzelius, cited in J. Loeb, *The Dynamics of Living Matter*, Columbia .53
University Press, 1906, New York, p. 7-8
- Cuvier, Letter to Mortrud, *Leçons d'anatomie comparée*, vol. I, p. .54
xvii
- Cuvier, *La Règne animal distribué d'après son organisation*, 1817, .55
vol. I, p. 7
- .56. גתה, הקדמה לאנטומיה משווה, עמ' 19.
- E. Geoffroy Saint-Hilaire, *Philosophie anatomique*, Paris, 1818, pp. .57
xxii-xxiii
- .58. קוביה, אנטומיה משווה, כרך 1, עמ' 50.

הלוגיקה של החי

59. אטיין ז'ופרואה סנט-הילר, פילוסופיה של האנטומיה, עמ' xxx.
60. שם, עמ' 19.
61. גתה, הקדמה לאנטומיה משווה, עמ' 30.
62. E. Geoffroy Saint-Hilaire, *Considérations sur les pièces de la tête osseuse*, in *Ann. Mus. Nat.*, 1807, 10, p. 342
63. קוביה, ממלכת החי, כרך 1, הקדמה, עמ' iv.
64. קוביה, אנטומיה משווה, כרך 1, עמ' 49.
65. שם, עמ' 57-56.
66. שם, עמ' 58.
67. קוביה, ממלכת החי, כרך 1, עמ' 10.
68. שם, עמ' 56-55.
69. אטיין ז'ופרואה סנט-הילר, פילוסופיה של האנטומיה, עמ' 18-19.
70. E. Geoffroy Saint-Hilaire, *Mémoire sur l'organisation des insectes*, in *Journal compl. des sciences médicales*, 1819, 5, p. 347
71. קוביה, ממלכת החי, כרך 1, עמ' 6.
72. קוביה, אנטומיה משווה, כרך 1, עמ' 60.
73. קוביה, ממלכת החי, כרך 1, עמ' 57.
74. Cuvier, *Mémoire sur les céphalopodes*, Paris, 1817, I. 143
75. קוביה, אנטומיה משווה, כרך 1, עמ' 59.
76. Bichat, *Traité des membranes*, Paris, 1816, p. 29
77. שם, עמ' 28.
78. שם, עמ' 31.
79. בישה, אנטומיה כללית, עמ' 35.
80. Oken, cited in M. Klein, *Histoire des origines de la théorie cellulaire*, Paris, 1936, p. 19
81. Dujardin, *Recherches sur les organismes inférieurs*, in *Ann. sc. naturelles*, 1835, 2nd series, vol. IV, p. 367
82. Schwann, *Microscopical researches into the accordance in the structure and growth of animals and plants*, tr. H. Smith, in *Schwann and Schleiden Researches*, Sydenham Society, 1847, p. 165 [reprinted in *Great Experiences in Biology*, ed. M. L. Gabriel and S. Fogel, Prentice-Hall, New York, 1955.]
83. שם, עמ' 192.
84. Schleiden, *Contributions to Phytogenesis*, tr. H. Smith in *Schwann and Schleiden Researches*, 1847, pp. 231-232 (הערה 82, לעיל).
85. שוואן, מחקרים, עמ' 193.
86. שם, עמ' 199.
87. שם, עמ' 190.
88. Virchow, *Die Cellularpathologie in ihrer Begründung auf physiologische und pathologische Gewebelehre*, Berlin, 1858, p. 25
89. שם, עמ' 12.

- von Baer, cited in E. Haeckel, *Anthropogénie*, French translation, .90
Paris, 1877, p. 165
- von Baer, cited in Darwin, *The Origin of Species*, 6th edition, 1872, .91
reprinted in World's Classics, Oxford University Press, 1951, p. 506
- E. Geoffroy Saint-Hilaire, *Philosophie anatomique*, II, *Des* .92
monstrosités humaines, Paris, 1822, p. 539
- E. Geoffroy Saint-Hilaire, *Histoire générale et Particulière des* .93
anomalies de l'organisation chez l'homme et les animaux, Paris,
1832, vol. I, 1, 18
- Remak, *Untersuchungen über die Entwicklung der Wirbelthiere*, .94
Berlin, 1850, p. 140
- von Baer, cited in E.B. Wilson, *The Cell in Development and* .95
Heredity, Macmillan, New York, 1925, p. 1035
- .96 וירכוב (הערה 88, לעיל), עמ' 25.
- Comte, *Cours de philosophie positive; Œuvres*, Paris, 1838, vol. III, p. .97
237

זמן

- Buffon, *Théorie de la terre; Œuvres complètes*, vol. I, pp. 109-111 .1
שם, כרך 2, עמ' 2.
- Diderot, *Entretien entre d'Alembert et Diderot*, edition de la Pléiade, .3
1946, p. 907; tr. J. Stewart and J. Kemp, in *Didero: Selected Writings*,
International Publishers, New York (Lawrence & Wishart, London),
1963, pp. 53-54
- De Maillet, *Telliamed*, The Hague, 1755, vol. II, p. 166 .4
שם, עמ' 169. .5
שם, עמ' 171. .6
- Robinet, *De la nature*, vol. IV, p. 17 .7
בונה, פלינגנזה. כתבים, כרך 15, עמ' 192. .8
שם, עמ' 219-220. .9
- Buffon, *Du Liève; Œuvres complètes* (b), vol. II, p. 540 .10
- Buffon, *Supplément à la théorie de la terre; Œuvres complètes* (b), vol. .11
IX, p. 424
- Buffon, *L'Unau et l'Air; Œuvres complètes* (b), vol. III, p. 443 .12
- Diderot, *Lettre sur les aveugles*, edition de la Pléiade, 1946, p. 871 .13
- Buffon, *Vue de la nature*, 2e vue; *Œuvres complètes* (b), vol. III, p. .14
414
- Buffon, *Dégénération des animaux; Œuvres complètes* (b), vol. IV, p. .15
123

- .16 . בופון (הערה 14, לעיל), עמ' 418.
- .17 . בופון (הערה 15, לעיל), עמ' 144.
- .18 . Maupertuis, *Système de la nature; Œuvres*, vol. III, p. 164.
- .19 . Maupertuis, *Vénus physique; Œuvres*, vol. II, p. 110.
- .20 . שם, עמ' 111-110.
- .21 . Maupertuis, *Essai de cosmologie; Œuvres*, vol. I, p. 11.
- .22 . שם.
- .23 . לאמארק, פילוסופיה של הזואולוגיה, כרך 1, עמ' 122.
- .24 . שם, כרך 1, עמ' 124.
- .25 . שם, כרך 1, עמ' 3-2.
- .26 . שם, כרך 1, עמ' 83.
- .27 . שם, כרך 1, עמ' 82-81.
- .28 . שם, כרך 1, עמ' 231.
- .29 . שם, כרך 1, עמ' 103.
- .30 . שם, כרך 1, עמ' 268.
- .31 . שם, כרך 1, עמ' 29.
- .32 . שם, כרך 1, עמ' 168.
- .33 . שם, כרך 1, עמ' 144.
- .34 . שם, כרך 1, עמ' 28.
- .35 . שם, כרך 1, עמ' 226.
- .36 . שם, כרך 1, עמ' 223-222.
- .37 . שם, כרך 1, עמ' 214; כרך 2, עמ' 81.
- .38 . שם, כרך 1, עמ' 214; כרך 2, עמ' 82-81.
- .39 . קוביה, אנטומיה משווה, כרך 1, עמ' 59.
- .40 . Comte, *Cours de philosophie positive; Œuvres*, vol. III, p. 235.
- .41 . Cuvier, *Discours sur les révolutions de la surface du globe*, 1830, p. 14.
- .42 . שם, עמ' 18.
- .43 . Lyell, *Principles of Geology*, 6 edition, John Murray, 1840, vol. I, Preface, p. ix.
- .44 . שם, כרך 1, עמ' 325.
- .45 . Lyell, *Manual of Elementary Geology*, 3rd edition, John Murray, 1851, p. 98.
- .46 . שם, עמ' 94.
- .47 . שם, עמ' 94.
- .48 . שם, עמ' 110-109.
- .49 . שם, עמ' 501.
- .50 . Humboldt, *Cosmos*, French translation, Paris, 1855, pp. 316-317.
- .51 . Darwin, *The Origin of Species* [1st edition 1859, John Murray; reprinted] Penguin Books, 1968, p. 384.
- .52 . שם, עמ' 444.
- .53 . שם, עמ' 172.

- .54 שם, עמ' 413.
 .55 שם, עמ' 404.
 .56 שם, עמ' 395.
 Wallace, *On the tendency of varieties to depart indefinitely from the original type*, in *Journal of the Linnaean Society*, 1859, vol. 3, p. 45 [also in *Evolution by Natural Selection*, ed. G. de Beer, Cambridge University Press, 1958, pp. 268-279] .57
 Malthus, *Essay on the Principle of Population*, 7th edition, Everyman Library, Dent, 1967, pp. 5-6 .58
 דארווין, מוצא המינים (הערה 51, לעיל), עמ' 98. .59
 שם, עמ' 131. .60
 Darwin, *The Origin of the Species* [6th edition, 1872, reprinted World's Classics], Oxford University Press, 1951, p. 101 .61
 דארווין, מוצא המינים (הערה 51, לעיל), עמ' 162. .62
 דארווין, מוצא המינים (הערה 61, לעיל), עמ' 133. .63
 דארווין, מוצא המינים (הערה 51, לעיל), עמ' 138-137. .64
 ואלאס (הערה 57, לעיל), עמ' 273. .65
 דארווין, מוצא המינים (הערה 61, לעיל), עמ' 143. .66

הגן

- Bernard, *Leçons sur les phénomènes de la vie*, 1879, vol. II, p. 2 .1
 Bernard, *Leçons de pathologie expérimentale*, 1872, p. 493 .2
 ברנאר, תופעות החיים, כרך 1, עמ' 356. .3
 Bernard, *La Science expérimentale*, 1878, p. 70 .4
 Bernard, *Introduction à l'étude de la médecine expérimentale*, 1865, p. 34 .5
 Bernard, *Leçons sur les propriétés des tissus vivants*, 1866, p. 6 .6
 ברנאר, תופעות החיים, כרך 2, עמ' 5. .7
 ברנאר, שם, כרך 1, עמ' 121. .8
 שם, כרך 1, עמ' 335. .9
 שם, כרך 1, עמ' 342. .10
 שם, כרך 1, עמ' 332. .11
 ברנאר, המדע הניסויי, עמ' 133. .12
 ברנאר, תופעות החיים, כרך 1, עמ' 340. .13
 Clerk Maxwell, *Theory of Heat*, 10th edition, London 1891, p. 338 .14
 Naudin, *Nouvelles recherches sur l'hybridité dans les végétaux*, in *Ann. Sc. Nat. Botanique*, 4th series, 19, p. 194 .15
 Mendel, *Experiments in Plant Hybridization*, English translation in .16

- W. Batson, *Mendel's Principles of Heredity*, Cambridge University Press, 1908, p. 318 [Reprinted in *Classic Papers in Genetics*, ed. J.A. Peters, Prentice-Hall, New York, 1959, p. 2]
17. שם, בייטסון, עמ' 321; כתבים קלסיים, עמ' 4.
18. שם, בייטסון, עמ' 336-337; כתבים קלסיים, עמ' 13-14.
19. שם, בייטסון, עמ' 331; כתבים קלסיים, עמ' 10.
20. שם, בייטסון, עמ' 344; כתבים קלסיים, עמ' 18.
21. שם, בייטסון, עמ' 345; כתבים קלסיים, עמ' 19.
22. מכתבו של מנדל אל גנלי, 18.4.1867, ראה *Great Experiments in Biology*, p. 229
23. Haeckel, *Anthropogénie*, French translation, Paris, 1877, p. 84
24. Richard von Hertwig, *Die Protozoen und die Zelletheorie*, in *Archiv für Protistenkunde*, 1902, vol. I, p. 1
25. F. Baltzer, *Theodor Boveri*, Berkeley, 1967, p. מצוטט על-ידי 121
26. שם, עמ' 70.
27. שם, עמ' 68.
28. E.B. Wilson, *The Cell in Development and Heredity*, 1925, p. 916 על-ידי
29. Huxley, *Evolution in Biology* (*Encyclopedia Britannica*, 9th edition, 1878), lecture XI in *Science and Culture*, London, 1882, p. 296
30. Weismann, *Essais sur l'hérédité*, French translation, Paris, 1892, p. 171
31. שם, 124.
32. שם, 125.
33. שם, 318.
34. שם, 154.
35. שם, 176.
36. שם, 176-175.
37. de Vries, *Espèces et variétés*, French translation, Paris, 1909, p. 458
38. Association of American Stockbreeders, *Proceedings*, vols. 1-5, 29.12.1903
39. דה פריס, מינים, עמ' 179-180.
40. שם, עמ' 18.
41. שם, עמ' 299.
42. שם, עמ' 361.
43. Helmholtz, *On the application of the law of the conservation of force to organic Nature*, in *Notice of the Proceedings of the Royal Institution of Great Britain*, 12.4.1861, p. 357
44. Berthelot, *La Synthèse chimique*, 1897, p. 203
45. שם, עמ' 215.

- .46 שם, עמ' 240.
 .47 שם, עמ' 272.
 .48 שם, עמ' 277.
 Pasteur, *Dissymétrie moléculaire*, *Œuvres*, 1922, vol. I, p. 327 .49
 .50 שם, עמ' 364.
 Pasteur, *Fermentations et générations dites spontanées*; *Œuvres*, vol. II, p. 224 .51
 Pasteur, *Études sur la bière*; *Œuvres*, vol. V, p. 216 .52
 .53 פסטר (הערה 51, לעיל).
 Büchner, *Berichte deutsche chemische Gesellschaft*, 1897, vol. 30, pp. 117-124, English translation, in *Great Experiments in Biology*, p. 28 .54
 Ostwald, *Lehrbuch der allgemeinen Chemie*, 1902, vol. II, p. 248 .55
 Loeb, *The Dynamics of Living Matter*, Columbia University Press, New York, 1906, p. 29 .56
 .57 שם, עמ' 33.
 .58 שם, עמ' 37.
 Haldane, *The Philosophical Basis of Biology*, London, 1931, p. 12 .59
 Bohr, 'Light and Life', in *Nature*, London, 1933, vol. 131, p. 458 .60
 Schrödinger, *What is Life?*, Cambridge University Press, 1956, p. 67 .61

המולקולה

- .1 שרדינגר, מהם חיים?, עמ' 68.
 Wiener, *The Human Use of Human Beings*, Doubleday, New York, 1954, p. 95 .2
 .3 שם, עמ' 26.
 .4 שרדינגר, מהם חיים?, עמ' 18-19.
 J. Clerk Maxwell, in Wiener, *Cybernetics*, 2nd edition, Massachusetts Institute of Technology, 1961, p. 58 .5

בין התפתחות לאבולוציה
ישעיהו ליבוביץ

בין התפתחות לאבולוציה

פרנסואה ז'אקוב הוא מן האישים הדגולים בביולוגיה של ימינו, וזאת מכמה בחינות, הן במחקר הניסויי והן בעיון. כגנטיקן עשה – יחד עם עמיתו ז'אק מונו ומורו אנדרה לבוף – דבר גדול בחקר התורשה על-ידי גילוי מכניזמים כימיים במגנון התורשה, הפועלים כמפעילים (או כמעכבים) של גנים שונים המצויים במכלול הגנים שבכל תא ותא באורגניזם. זהו צעד חשוב לקראת הבנת ההתמיינות של הרקמות השונות שתאיהן מתהווים כולם מתא אחד בתהליך התפתחותו של האורגניזם מנבטו, התהליך שהבנתו היא הבעיה המרכזית של הביולוגיה העיונית – האונטוגנזה. נוסף על הדיפרנציאציה קיימת באונטוגנזה גם בעיית הארגון: התהוות מבנים (איברים) שונים, הגבדלים זה מזה גם מבחינה תיפקודית, ועם זה מצטרפים יחד ליחידה תיפקודית אחת, שהיא האורגניזם בשלמותו; ומן היחידה הביולוגית הזאת אל מערכת החיים כולה והתהוותה – הפילוגנזה או האבולוציה. מכאן השלכות על הפילוסופיה של הביולוגיה, ואיש המחקר הניסויי ז'אקוב מתגלה כאן כאחד מהוגיה.

בחיבורים שנועדו לציבור הרחב של משכילים שאינם ביולוגים מקצועיים, מציג ז'אקוב בצורה מושלמת את העובדות שקבעה הגנטיקה בתופעות התורשה ואת הבעיות הנובעות מהן, ומשתדל לתת עליהן תשובות שקולות וזהירות על-ידי הבחנה ברורה בין מה שהוכח והובן ובין מה שעדיין אינו מובן כלל –

והוא דווקא העיקר. מבחינה זו גבדל ז'אקוב לטובה מכמה מעמיתיו למקצוע הדגולים, שיש מהם הרואים בהישגיה של הביולוגיה החדשה את פתרון 'חידת החיים'.

ז'אקוב רואה בתורת האבולוציה את המסגרת ההכרחית לכל הבנה של מהותנו הביולוגית, ועם זאת – שלא כרבים מן החוקרים וההוגים כיום – הוא מכיר במגבלותיה: עד היכן הגיעה בהסבריה כתיאוריה מדעית ומאיזו נקודה ואילך היא נעשית מיתוס. אין הוא נגרר אחרי האידיאולוגיות המסיקות מן הביולוגיה מסקנות לגבי בעיות הפילוסופיה הכללית, בעיות אנושיות ספציפיות, במוסר, בתורת הערכים, באמונות ובדעות. מבחינה זו קיים ניגוד עמוק בינו לבין עמיתו (הקרוב אליו ביותר במישור המקצועי) ז'אק מונו, שניסה לבנות 'השקפת עולם מדעית' על בסיס ההפרות הביולוגיות, ולספרו הפופולרי-למחצה 'מקורות והכרח' (1970) היה הד רב בעולם האקדמי וגם הפובליציסטי-הכללי.

ז'אקוב מכיר באבולוציה כעובדה יסודית בהיסטוריה של החיים; החיים כפי שאנו מכירים אותם היום, במהותם המורפולוגית והתיפקודית, הם מוצריה הסופיים (עד היום) של היסטוריה זו. אין הוא מטיל ספק בכך שהגורמים המקריים שפעלו בה – ומן-הסתם מוסיפים לפעול בה – הם המכניזם הגנטי (מוטציות) והבירור הטבעי. את המכניזם הגנטי אנו מכירים היום, והכרתו משתלבת במושגים שנתקיימו מן הדארוניזם הקלסי, ושילוב זה הוא 'התיאוריה הסינתטית' הרווחת היום. ז'אקוב עומד על תקפותה של התפישה הניאודארוניסטית הזאת ורואה את הערעורים הניאור-לאמארקיסטיים החדשים עליה כבטלים. אולם – שלא כרבים מחשובי הביולוגים היום – אין הוא רואה בה אלא תיאור נכון של ההיסטוריה של החיים ולא הסבר שהיא מסוגלת לתת לו.

ההישגים הכבירים בחקר התורשה בדור שלפנינו (הבהרת הכימיה של המנגנון הגנטי) הביאו רבים להאמין שבזה נפתרה 'חידת החיים', זאת אומרת – שמעתה ניתן להעמיד את הפנומן

'חיים' בשלמותו, את האורגניזם החי, על מערכת פסיקורכימית, שממנה התחייבו, בגלל הגורמים הסיבתיים הגלומים בה, קורות החיים בעבר שהביאו לדמות החיים בהווה. פרנסואה ז'אקוב לא נתפס לאמונה תמימה זו, והוא מכיר שדווקא ההישגים במחקר הניסויי של החיים – ובכללם גם תרומתו שלו לגנטיקה – מעוררים בעיות קשות ביותר בהגות הביולוגית, עד כדי אנטינומיות בחשיבה. בזה נעשה ז'אקוב דמות מרכזית בפילוסופיה של הביולוגיה, שלא מעטים מתחבטים בה בימינו מבחינת עימות בין מושגי גרימה סיבתית מזה וביצוע פרוגרמה מזה (קרוב לעמדתו של ז'אקוב הוא מ.פ. פרוץ מקיימברידג', גם הוא כז'אקוב חתן פרס נובל בביולוגיה).

בשילוש תורשה (גנטיקה) – התפתחות (אונטוגנזה) – אבולוציה (פילוגנזה), שלגבי כל אחד ממרכיביו צברנו ידע עובדתי עצום, הבעייתיות היא בקשר שביניהם ובהתייחסותם זה לזה. התיאוריה הסינתטית המקובלת היום מקבלת בפשטות את הנחת העובדה שהאונטוגנזה מוכוונת על-ידי מה שוודינגטון כינה 'האסטרטגיה של הגנים'; לשון אחר: שהאורגניזם הוא מוצר הגנים שלו; עוד לשון אחר: שהפנוטיפוס מעוצב על-ידי הגנוטיפוס. לפיכך שינוי בגנוטיפוס (מוטציה) גורר שינוי בפנוטיפוס, ומכיוון שהפילוגנזה אינה אלא מכלול כל האונטוגנזות שאירעו מעולם ועד היום – מתחייבת האבולוציה מן הלחץ של הבריור הטבעי הפועל בין המוטציות. אולם נקודת התורפה במבנה הרעיוני הזה היא שהמעבר מן הגנוטיפוס לפנוטיפוס אינו מובן לנו כלל גם לאחר הבהרת מהות המנגנון הגנטי, ולא זו בלבד אלא שדווקא הבהרה זו מחמירה את הבעיה ביותר. היום אנו יודעים שהגנום הוא מערכת כימית טהורה והפונקציות שלו הן כימיות ישירות או קטליטיות; ואילו המבנה והפונקציות אפילו של האורגנלים שבתא הבודד, ואצל איברי האורגניזם הרב-תאי והרב-רקמתי, ועל אחת כמה וכמה של האורגניזם בשלמותו, אינם ניתנים לתיאור בקטגוריות כימיות בלבד. מבחינה קונצפטואלית אבסורדי הוא להניח שהידע התורשתי, הגלום בצורה תדממדת בשרשרת הפולינוקליאוטידית של ה-DNA, גורם להתהוות המבנים

התלת־ממדיים השונים, הן ברמה המולקולרית והן ברמה המאקרוסקופית, ולשינויים של המבנים בתהליך האבולוציה; ואילו הפונקציה הספציפית הבסיסית של החי היא האונטוגנזה – התהוותו מגבטו. אין להבין כלל כיצד באבולוציה של היונקים מן הזוחלים במשך מיליוני שנים, בעקבות מציאותם או העדרם של נוקליאוטידים מסוימים או חילופי מקומותיהם באותה שרשרת, הפך מִפְּרָק הלסת לאוזן הפנימית והפכו עצמות המפרק לעצמות השמע באוזן הפנימית, ואין אנו מבינים כיצד באבולוציה של העופות מן הזוחלים התהוותה כנף מרגל. גם הגנטיקה והבירור הטבעי אינם מסבירים זאת, משום שגם בהווה אין אנו מבינים כיצד הגנים שבכרומוזומים שבעובר האפרוח גורמים לצמיחת כנפי התרנגולת. האם זו גרימה סיבתית – הנובעת מן העבר, או שמא גרימה תכליתית – ביצוע של פרוגרמה? והשאלה הנוקבת הזאת קמה על רקע תקפותו של הניאודארוניזם ודבר זה נראה לנו כאנטינומיה. אפשר שזאת היא הנקודה החשובה ביותר בבעיית ההבנה המדעית של החיים כפי שז'אקוב מציגה.

העמקת הבנת משמעותה הפילוסופית של השאלה הזאת מחייבת סקירה על גלגולי הצגתה ונסיונות מתן תשובה עליה בחשיבה הביולוגית במאתיים השנים האחרונות של המדע החדש – עד ז'אקוב במחצית השנייה של המאה ה-20. כסמנים בשלבים השונים של דרך זו אני רוצה להציג את קאנט (המחצית השנייה של המאה ה-18), את קלוד ברנאר (אמצע המאה ה-19) ואת הנס שפימן (המחצית הראשונה של המאה ה-20).

*

קאנט ה'קדם ביקורתיו', בחיבור נעוריו 'מדע הטבע ותורת השמים' (1755), מביע את אמונתו 'שקרוב יותר לצפות שנגיע להכרה... של מוצאה של כל מערכת העולם כמות שהיא, מאשר שנגיע להבנה ברורה וממצה של התהוות גבעול עשב אחד או זחל אחד מכוחם של גורמים מכניים'. במונח זה התכוון קאנט

למה שהיה מוכר כ'סיבות' במובן מדעי בעולמו של המדע של ימיו שלא היה אלא הפיסיקה הניוטונית – וזאת להבדיל מן המדע העתיק, שהכיר את המושג 'הסיבה התכליתית'; ההסבר 'התכליתי' (הטליאולוגיה) שויך עתה לחשיבה הספקולטיבית, ה'לא-מדעית'. מן הכלל הגדול הזה, התקף לגבי הכרת כל תופעות הטבע, הוציא קאנט באותה שעה את ההתפתחות האורגנית: את העיצוב העצמי של יצור חי בהתהוותו, מנבטו, שהוא – לדעתו – אינו מוסבר ממנגונוני תנועת החומר המתוארים בפיסיקה. ככל בניידורו הכיר קאנט אז בקיומו של 'כוח חיים' ספציפי, הפועל לפי עקרון התכליתיות; להתפתחות כעובדת היסוד של החיים ניתן הסבר טליאולוגי.

אולם כ-25 שנים לאחר מכן, עם מהפכתו הביקורתית ('ביקורת התבונה הטהורה', 1781), הבחין קאנט לגבי הנושא סיבתיות-תכליתיות בין המישור האונטולוגי למישור האפיסטמולוגי, בין 'עיקרים מתוכננים' (את היש) ל'עיקרים מכוונים' (את החשיבה על היש). עלינו להבדיל בין עולם החי לעולם הדומם לא מבחינת מהותם אלא מבחינת הקטגוריות של היתפשותם בחשיבתנו; לשון אחר: בעייתנו איננה 'החי לעומת הדומם' אלא 'הביולוגיה [המונח עדיין לא היה קיים בימי קאנט] לעומת הפיסיקה'.

מבחינת מדע הטבע בכלליותו, הטליאולוגיה היא לקאנט יסוד מכוון של המחקר ולא יסוד מכוון של המציאות הטבעית עצמה. הסיבתיות היא מן הקטגוריות של חשיבתנו על כל נתון טבעי או מאורע בטבע; והיא המהות של הכרתם המדעית. אולם לשם סיסטמטיזציה של הידע יש שאנו נזקקים לטליאולוגיה, שבלעדיה לא תיתכן תיאוריה מדעית. השימוש במושג תכלית מדריך אותנו בחיפוש אחר הפרות סיבתיות-מכניות. אין אנו מסבירים את התופעות אלא בקביעת חוקי טבע סיבתיים-מכניים (לא טליאולוגיים), אולם לשם הכוונת המחקר אנו נוהגים בחשיבתנו כאילו היה העולם תכליתי או מכוון. דבר זה אמור כנגד הביולוגיה, שבה אנו רואים את המערכת הגדולה של תופעות החיים בגוף החי כאילו הן מסודרות יחד לתכלית

אחת, אף-על-פי שאנו מבינים שכעובדות טבעיות הן כפופות לסיבתיות מכנית. נמצא שבשלב זה של עיונו במדעי הטבע לא הבחין קאנט בין חי לדומם מבחינה אונטולוגית אלא מבחינה אפיסטמולוגית בלבד.

כעשר שנים לאחר מכן (ב'ביקורת כוח-השיפוט', 1790) דומה שקאנט מעמיק את ההבדלה בין חי לדומם ומחייב לגבי האורגניזמים החיים גישה טליאולוגית, הנראית כמתקרבת להבחנה אונטולוגית. בדיון זה אין הוא משתמש במונחים 'יצורים חיים' או 'בעלי-חיים' או 'צמחים' אלא גורס בקביעות 'ישים מאורגנים' – מונח המורה על שורש הבעיה. אין להבין כיצד יפיקו חוקי-הטבע המכניים מערכות מאורגנות, שחלקיהן קשורים ביניהם קשרים פנימיים, כשלכל חלק או תהליך חלקי משמעות או תיפקוד מכוון לגבי הגוף בשלמותו. קאנט מכיר שהיחוד שבתופעת החיים הוא בדרך התהוותו של האורגניזם מנבטו – בתהליך ההתפתחות. קאנט אמר מה שאמר – ב־1755, ב־1781, ב־1790 – לפני תחילתה של מה שאנו מכירים היום כביולוגיה המדעית, שמרכיביה הם הביוכימיה מזה והפיסיולוגיה הניסויית מזה. קאנט, ככל קודמיו וככל בני-דורו, לא הכירו את החיים אלא מתוך תצפית כללית בפנומן של האורגניזם החי, אשר לשם הבנת המתרחש בו נאלצו להיאחז במושג 'כוח החיים' (התפיסה הוויטליסטית) כגורם המפעיל את התהליכים בגוף שבהם מתגלמים חייו.

המפנה המכריע חל במחצית הראשונה של המאה ה-19. תחילה עורערה האמונה במציאותה של 'כימיה אורגנית' ספציפית על-ידי ההוכחה שאין היא 'אורגנית' כלל, זאת אומרת – אין היא מיוחדת לאורגניזמים החיים, אלא היא כימיה סתם. באותה תקופה הונחו היסודות לפיסיולוגיה הניסויית – חקר תופעות החיים במתודות הבדיקה והמדידה הפיסיקו-כימיות המעבדתיות. רק אז יכול היה אחד ממניחי היסודות האלה, קלוד ברנאר, לעשות את ההבחנה הגדולה בין החיים ובין המגננונים הפועלים בחיים (סיכום מפעלו המדעי: ספרו 'תופעות החיים המשותפות לבעלי-חיים ולצמחים', 1878). בדומה

לקאנט, ראה גם ברנאר בהתפתחות¹ את עצם התגלמותה המוחשית של עובדת החיים, אלא – שלא כקאנט – קבע שכל תהליך מוחשי המתרחש בחיים מופעל על-ידי מנגנון המוגדר ומתואר בקטגוריות של מדעי הטבע הכלליים, הכימיה והפיסיקה, בדומה לכל מה שמתרחש בכל מכוונה, ולשם הסברתו אין צורך ואין טעם להשתמש במושגים שמעבר למדעי הטבע הכלליים, כגון 'כוח-חיים' וכדומה. בשעתה היתה טענה זו נועזת מאוד, כי ברנאר ובני-דורו עדיין היו בראשית הדרך המובילה לאפשרות של מתן הסבר כזה לכל הפונקציות הפיסיולוגיות, אולם הוא צפה מראש שהאפשרות תהיה למציאות. בזה דחה לחלוטין את הגישה הוויטליסטית, ויש רואים בו את חלוצה של הגישה המכניסטית בביולוגיה. אולם קלוד ברנאר ראה את הנולד גם מבחינה אחרת, ההפוכה כמעט למכניציזם. הוא אמנם העמיד את הפיסיולוגיה על פיסיקה וכימיה בלבד, אבל על כך הוסיף התראה חמורה: 'בהכירנו שתופעות החיים הן תופעות פיסיקו-כימיות, לא הבהרנו כלל את בעיית מהות החיים, שהיא – ביצוע פרוגרמה'. אמנם פעולה לפי פרוגרמה היא גם מהות פעילותה של כל מכוונה, אלא שבזו האחרונה מוכתבת הפרוגרמה לגורמים הפיסיקו-כימיים הפועלים בקירבה על-ידי תוכנית בנייתה בידי בונייה; ואילו בחיים גלומה הפרוגרמה בהם עצמם, ותוכנה הוא – לקיים את עצם תהליך החיים, ולתכלית זו משועבדים כל המנגנונים הפועלים בהם, ואפשר שהחשוב שבמנגנונים הוא המונח ביסודה של התורשה והמוכר לנו היום.

וקלוד ברנאר ממשיך: 'במסגרת החיים, הפרוגרמה הזאת היא בבחינת הרשות המחוקקת' (רצונו לומר בזאת – שהיא קובעת לאיזו תכלית של האורגניזם משמשים המנגנונים); 'ואילו הגורמים הפיסיקו-כימיים הם בבחינת הרשות המבצעת. החיים מכוונים את התופעות שבביצוען אין להם חלק; הגורמים הפיסיקו-כימיים מבצעים את התופעות שאותן אין הם מכוונים'. לכאורה, ברנאר מחזיר בזה חשיבה טליאולוגית בעיון ובדיון

1 יחד עם ההומאוסטזה – שבה לא נוכל לדון כאן.

בחיים. אולם יחד עם זה הוא דוחה בתריפות כל ניסיון להחדירה לביולוגיה, שאותה הוא מציג כאחד המקצועות במדעי הטבע, שאינם מכירים אלא את החשיבה הסיבתית ואינם עוסקים אלא במה שנתפס במתודות של המחקר הניסויי. אין ברנאר כופר במציאותו של גורם בחיים שהוא מעבר לקריטריונים החמורים של מדעי הטבע – הלוא הוא 'הרשות המחוקקת', אלא שזו – למרות משמעותה היסודית לגבי הפנומן 'חיים' – אינה עונה לקריטריונים ההם, ולפיכך העיסוק בה שייך להגות הפילוסופית. הנושא של המחקר המדעי אינם אלא מרכיבי 'הרשות המבצעת', המזוהים כמכניזמים. מכאן המסקנה הפרדוקסלית שהמדע ביולוגיה (=תורת החיים) אינו עוסק – ואינו מסוגל לעסוק – בחיים עצמם אלא רק בתופעות המוחשיות שבהן הם מתגלמים.

דברים אלה נאמרו לפני כ-120 שנה, כשלא היה ידוע דבר על מנגנון התורשה, הקובע את מהלך האונטוגנזה שהיא עצם תהליך חייו של האורגניזם. והוא הדין לגבי המכניזמים של האורגניזם. מהתהוותו מנבטו עד להשלמתו, התורשה לא היתה מוכרת אלא רק בתצפית מן החוץ. בינתיים צברנו מידע והגענו להבנה עמוקה במנגנון של העברת תכונות תורשתיות ושל השינויים החלים בו,² ואף נודע לנו משהו במנגנון ההתפתחות.³ ההתקדמות העצומה הזאת, הנראית כנועדה להבהיר את עובדות היסוד של החיים, דווקא היא מחוללת היום משבר בביולוגיה, משום הפער שנתגלה בין ההכרות של הגנטיקה ובין תופעות ההתפתחות. מצד אחד – ברור הוא שהתורשה קובעת את כיוון ההתפתחות; מצד אחר – במנגנון התורשה, המוכר לנו היום, אין אלא פעילות כימית בלבד, שממנה לא יתכן – מבחינה קונצפטואלית – לגזור את העיצוב של צורות המבנים השונים באורגניזם על התיפקודים השונים שלהם. ואם אין הכימיה הגנטית מסוגלת להסביר את ההתפתחות האונטוגנטית – משום העדר גורם מורפוגנטי בגנום – קל וחומר שאין בה כדי

2 ממנדל עד ווטסון־קריק ועד ז'אקוב, מונו ולבוף.

3 מרו ודריש עד שפימאן, ושוב עד ז'אקוב.

להסביר את ההתפתחות הפילוגנטית.⁴ היש מובן בטענה שמערכת של סינתזות כימיות (שינויים בשרשרות פולינוקליאידיות, הגוררים שינויים בשרשרות פוליפפטידיות – מוטציות), גרמה במרוצת הדורות להפיכת הרגל הרב־אצבעית של הסוס הקדמון לרגל החד־אצבעית של הסוס של ימינו? או הקנתה לקבוצה של פרימטים הולכי־על־ארבע את כושר ההליכה על שתיים? הכיווניות והתכליתיות של ההתפתחות אינן נגזרות מן הסיבתיות של הכימיה הגנטית.

ההבחנה הגדולה שהבחין בשעתו קלוד ברנאר בין החיים ובין המנגנונים הפועלים בחיים מזדקרת לעינינו בכל חריפותה דווקא כשהצליח המחקר הביולוגי החדיש להבהיר את מנגנון התורשה. כל זמן שלא הובהר, מותר היה להאמין שבו גלום מנגנון החיים; רבים ציפו שעם הבהרתו תיפתר 'חידת החיים'. עתה גילינו שהתורשה היא מנגנון הפועל בחיים, אך אינה החיים עצמם, שהרי אין היא מסבירה את התופעה היסודית של החיים – את ההתפתחות. גדול חוקרי ההתפתחות בדור שלפנינו, הנס שפימאן, סיכם את עבודת חייו (שבה נכלל, בין השאר, גילוי האינדוקציה העוברית וה'אורגניזטור') בספר 'התפתחות אמבריוולוגית ואינדוקציה' (1938), שזה סימומו: '...בספר זה מרובים הניסוחים, שאין להם משמעות של אנלוגיות פסיקליות אלא משמעות של אנלוגיות פסיכולוגיות; ואין בכך משום תפארת המליצה בלבד. זה בא ללמדנו, שאם חלק שבנבט, שבו גלומות אפשרויות־פעולה (Potenzen) מרובות ושונות, מגיב בהתאם למיקומו במסגרת "השדה העוברי" ומתנהג בהתאם ל"סיטואציה" המסוימת – יש בכך יותר מריאקציות כימיות רגילות, בין פשוטות ובין מסובכות. זה בא ללמדנו, כי בין שאפשר יהיה בזמן מן הזמנים לפרק את תהליכי ההתפתחות,

4 ראויה לעיון מבחינה היסטורית ופילוסופית, העובדה המופלאה שראשית המחקר המדעי של האבולוציה – המתייחס למציאות מקיפה בזמן ובמקום, שהיא מעבר לכל אפשרות של תצפית ואינה מוכרת לנו אלא כמערכת של מסקנות ממה שידוע לנו – קדמה 2-3 דורות לראשית המחקר המדעי של האונטוגנזה, המתייחס למציאות שהיא נתון ראשוני להכרתנו הישירה ומוכרת לנו בעליל בכל שעה ובכל מקום.

ואת כל תהליכי החיים כמותם, למכלול של תהליכים כימיים ופיסיקליים או לבנות אותם ממכלול זה, ובין שלא יהיה אפשר לעשות את הדבר – הרי מבחינת השתלבותם ההדדית של תהליכים אלה, אין בכל המוכר לנו דבר שהם דומים לו יותר מתהליכי החיים הקרובים לתודעתנו קירבה אינטימית ביותר: התהליכים הפסיכיים. מכאן – מחוץ לכל השיקולים הפילוסופיים, ולמען סיפוק צורכי הביסוס המוחש והמדויק של מדענו בלבד – שאל לנו לוותר על יתרון מעמדנו בין שני העולמות.

אלה הם דברים כבדי־משקל ורבי־משמעות ביותר, והם מציגים גם היום – כ-60 שנה לאחר כתיבתם – בצורה מושלמת את הבעיה הפילוסופית הגדולה של הטליאולוגיה בביולוגיה, של העימות של סיבתיות ותכליתיות בתפיסת־החיים ובהבנת הביולוגיה. לכאורה ניכרים בדברי שפימאן רישומי הרהורים מעין־אריסטוטליים בדבר סיבה צורנית וסיבה תכליתית, ויש היום בין הביולוגים – גם בקרב תלמידי המובהקים של שפימאן, כגון הולטפֶן־טֶר – הממשיכים בדרך במחקר הניסויי של ההתפתחות, ויחד עם זה הם 'מאשימים' את רבם בנטיה לניאוריטליזם, שיש בה משום שיבה לחשיבה 'קדם־מדעית', מיסטית כמעט. דומני שאין הצדקה לטענה זו: ספקנותו של שפימאן לגבי האפשרות של מתן הסבר מכניסטי ממצה, במושגים פיסיקור־כימיים, לתופעות ההתפתחות אינה נובעת מאמונה בגורם על־טבעי הפועל בחיים, אלא היא מסקנה המתחייבת לו, כאיש־מדע מובהק, מממצאי הניסויים שלו, והיא מתייחסת להכרה המדעית דווקא ('...מחוץ לכל השיקולים הפילוסופיים ולמען סיפוק צורכי הביסוס המוחש והמדויק לשם ביסוס של מדענו בלבד...'). אין הוא מציג מציאות פסיכית לעומת מציאות פיזית, אלא אנלוגיות בין חשיבה פסיכולוגית לחשיבה פיסיקלית בביולוגיה. המושג 'שני עולמות', המסכם את דיוגו, אינו מכוון להנחת שְׁנִיּוֹת אוֹנְטִית אלא לקביעת שניוֹת הכרתיות. שפימאן אינו מדבר כמטאפיסיקן אלא כמדען – ומכאן דווקא החשיבות של דבריו להבנת הבעיה הפילוסופית המרכזית של הביולוגיה בימינו. עמדתו של שפימאן מזכירה לנו את ההבחנה הקאנטית בין מה ש'מכונן' את המציאות הטבעית

ובין מה ש'מכוון' את חשיבתנו עליה. אולם ביותר קרוב שפימאן לקלוד ברנאר (ר' לעיל) שהבחין בחיים בין 'רשות מבצעת' ל'רשות מחוקקת'; אלא שברנאר – כנראה – נתכוון לשניות במובן האונטולוגי ואילו תפישתו של שפימאן היא בעיקרה אפיסטמולוגית.

יש צד שווה בקלוד ברנאר ובהנס שפימאן למרות רווח הזמן של שני דורות המפריד ביניהם ולמרות שפע הידע שעמד לרשותו של שפימאן ועדיין לא היה קיים במאה ה-19. לשניהם יחודה של הביולוגיה הוא בכך שיש בה שני פנים: מבחינת עיסוקה במנגנונים של החיים – ובזה נכללת הגנטיקה – היא שייכת לחשיבה של עולם מדעי הטבע, שאינה מכירה אלא את הקטגוריה של הסיבתיות בלבד; מבחינת עיסוקה בחיים עצמם – וזהו עניינו של חקר ההתפתחות – היא קרובה לעולם מדעי הרוח, שבו מקיפה החשיבה גם את הקטגוריה של התכליתיות. מה בין 'שני העולמות' של שפימאן ל'שתי הרשויות' ('המבצעת' ו'המחוקקת') של ברנאר? שברנאר שואף להגיע להבנת ההתרחשויות המוחשיות בחיי האורגניזם ('ה'ביצוע') כמכניזמים הפועלים בהזתאם לסיבתיות הפיסיקו־כימית גרידא; ואילו שפימאן מתיחס ל'ביצוע' משתי בחינות – פיסיקו־כימית סיבתית מזה ותכליתית מזה; האחרונה היא מעין החקיקה של ברנאר.

*

לבעייתיות הקיימת היום בהסברה של האונטוגוזה על־פי היסודות הביוכימיים של התורשה יש השלכות על הפילוגוזה. היום אין מטילים ספק באבולוציה כרקע וכבסיס של כל המציאות של החיים כפי שאנו מכירים אותם, על כל היבטיהם המורפולוגיים והתיפקודיים. החיים כמות שהם היום הם פרי תהליך התפתחותי שהתחייב מן היסודות הגנטיים, שמהותם מוגדרת בקטגוריות של הביולוגיה המולקולרית, זאת אומרת – הבנת האבולוציה אינה נזקקת להנחת כוח או גורם שמעבר לטבע הפיסיקו־כימי. פרנסואה ז'אקוב, כרוב הביולוגים היום, מקבל את 'הותיאוריה הסינתטית' – את הניאודארוויניזם –

כהסבר של תהליך היסטורי זה. אולם הוא מכיר את תולשתה של אחת החוליות של השרשרת הרעיונית הקושרת בחשיבה סיבתית את השלב הסופי (לפי שעה) של האבולוציה – את החיים כפי שהם בפועל – עם ראשיתה במציאות פסיקו־כימית גרידא. חוליה זו היא האונטוגנזה – עיצוב האורגניזם השלם והמושלם על־ידי הגורמים הפסיקו־כימיים הגנוזים בנבטו; לשון אחר: המעבר מן הגנוטיפוס אל הפנוטיפוס. ז'אקוב מטעים את העובדה – שהרבה ביולוגים משתדלים לטשטשה – שדווקא השלב המכריע הזה בחייו של כל אורגניזם עדיין נשאר סתום להבנתנו גם על רקע כל הידע שצברנו במחקר הגנטי; בכך מודה גם הולטפרטר, המשתדל להעמיד את הבנת ההתפתחות כולה על בסיס של סיבתיות פסיקו־כימית. אולם בהעדר תיאוריה המניחה את הדעת להסברת האונטוגנזה, אין תיאוריה כזאת אפשרית לגבי הפילוגנזה, וההסבר הניתן לאבולוציה מן המוטציות בגנום (ולחץ הבירור הטבעי) הוא פורמלי גרידא. בפירצה הזאת שבחומת ההסבר הסיבתי הניאו־דארוויניסטי של האבולוציה עלולים מושגים (או על כל פנים מונחים) שמשמעותם טליאולוגית לחזור ולחדור לחשיבה הביולוגית.

שמה נצטרך להציג שאלה 'אפיקורסית' – וזאת כתומר למחשבה בלבד, ללא כל יומרה של הצעת היפותזה או תיאוריה חדשה. אולי לא השינויים במנגנון הגנטי – המוטציות – הם הבסיס של ההתפתחות הפילוגנטית, משום שמנגנון זה אינו שייך אלא ל'רשות המבצעת'; ואילו, לאמיתו של דבר, נהפוך הוא: ההתפתחות – שהמכניזם שלה עדיין עלום מאתנו לגמרי, והיא התגלמות פעילותה של 'הרשות המחקקת' – היא היא הגוררת את השינויים הגנטיים?

ביבליוגרפיה

- קאנט, ע. (1755) מדע הטבע ותורת השמים.
קאנט, ע. (1781) ביקורת התבונה הטהורה. תרגום עברי, ירושלים 1954.
קאנט, ע. (1790) ביקורת כוח השיפוט. תרגום עברי, ירושלים 1961.
- Bernard, C. (1878) *Leçons sur les phénomènes de la vie commune aux animaux et aux végétaux*, Paris.
- Holtfreter, J.F. (1988) *A new look at Spemann's organizer*, In: *Developmental Biology*, L.W. Browder (ed.), Plenum press.
- Monod, J. (1970) *Le hazard et la necessite*, Edition du Seuil, Paris.
- Spemann, H. (1938) *Embrionic development and induction*, Yale University Press.
- Waddington, C.M. (1963) *The nature of life*. London.

פרטים ביוגרפיים

אברי, אוסוולד Avery, Oswald (1877-1955) בקטריוולוג אמריקאי. במחקריו על בקטריות פנאומוקוקיות הניח את הבסיס לאימונוכימיה, וכך נסללה הדרך לגילויים נוספים שבעקבותיהם התפתחה הגנטיקה המולקולרית.

אדנסון, מישל Adanson, Michel (1727-1806) חוקר־טבע צרפתי ממוצא סקוטי. סייר ותיאר את הטבע של אפריקה המערבית. עיקר פעילותו בבוטניקה.

אוון, ריצ'רד Owen, Richard (1804-1892) אנטומאי אנגלי ופלאונטולוג. פירסם ב-1863 תיאור של הארכיאופטריקס, הציפור המאובנת הראשונה. ב-1954 התברר שהתיאור היה שגוי מבחינה אנטומית.

אוסטוואלד, וילהלם Ostwald, Wilhelm (1853-1932) כימאי גרמני. אירגן, כמעט בעצמו, את הכימיה הפיסיקלית לענף עצמאי של הכימיה. זכה בפרס נובל בכימיה ב-1909 על מחקריו בקטליזה, שיווי־משקל כימי ומהירויות ריאקציה.

אוקן, לורנץ Oken, Lorenz (1779-1851) חוקר־טבע גרמני. מייסד האסכולה של פילוסופיית

הטבע. חשב שניתן לאפיין כל מחלקה של בעלי-חיים עלידי מערכת אורגנית שלטת: שלד בדגים, חושים ביונקים, וכדו'.

איינשטיין, אלברט Einstein, Albert (1879-1955) פיסיקאי יהודי, יליד גרמניה. יוצר תורת היחסות. פיתח את תורת הקוואנטים והפוטונים. זכה בפרס נובל בפיסיקה ב-1921.

אלדרובנדוס, יוליסס Aldrovandus, Ulysse (1522-1605) חוקר-טבע ורופא איטלקי. ידוע בזכות תצפיותיו השיטתיות והמדויקות בבעלי-חיים, צמחים ומינרלים. יוצר הגנים הבוטניים בבולוניה.

אקוופונדטה, פבריציו דה Acquapendente, Fabricio d' (1533-1619) מנתח ואנטומאי איטלקי ידוע מאוד. תרם להולדת האמברולוגיה המודרנית.

אריסטו Aristotle (384-322 לפנה"ס) פילוסוף יווני בן אתונה, תלמיד של אפלטון. מגדולי הפילוסופים היוונים, שהניח את היסוד לתורת ההיגיון הפורמלית. כתב מחקרים על הטבע.

באטלר, סמואל Butler, Samuel (1835-1902) סופר ומבקר אנגלי. הסאטירה שלו *Erewhom* (1872) צפתה את קריסתה של האשליה הוויקטוריאנית בדבר התקדמות מתמדת. היה מתומכיה הנלהבים של התיאוריה של דארוין בעת פירסומה, אך לאחר מכן חזר בו כשגילה, לדבריו, את האל.

באר, קרל-ארנסט ריטר פון Baer, Karl Ernst Ritter von (1792-1876) אמבריוולוג פרוסי-אסתוני. גילה את הביצית והנוטוכורד ביונקים. ביסס את האמברולוגיה והאנטומיה המשווה בראשיתן.

בארנט, תומס Burnet, Thomas (1635-1715) איש-דת אנגלי. נודע על חיבורו 'תיאוריית הקודש של

הארץ' (1681). הספר כולל תיאוריה על מבנה כדור-הארץ, שבה השתמשו פילוסופים בני הזמן בניסיון ליישב את הנאמר בכתביהקודש על הבריאה ועל גן-עדן עם עקרונות המדע.

בוברי, תיאודור Bovery, Theodor (1862-1915) ציטולוג גרמני. הראה במחקריו בביצי תולעים עגולות שהכרומוזומים מצויים בגרעין התא, וכי הם יחידות נפרדות ורציפות. הוכיח שתא הביצית ותא הזרע תורמים מספר שווה של כרומוזומים לתא-הבת החדש.

בוהר, נילס הנריק דוד Bohr, Niels Henrik David (1885-1962) פיסיקאי דני. פיתח את תורת מבנה האטום המודרנית. זכה בפרס נובל בפיסיקה ב-1922. השתתף בפיתוח פצצת האטום בארצות-הברית לאחר שהוברח אליה ב-1945.

בולצמן, לודוויג Boltzmann, Ludwig (1854-1906) פיסיקאי אוסטרי. אבי התיאוריה הקינטית של הגזים. בזכותו יושם ניתוח סטטיסטי בחקר התרמודינמיקה.

בונה, שארל Bonnet, Charles (1720-1793) חוקר-טבע ופילוסוף שווייצרי. עסק בעיקר בחסרי-חוליות. גילה את הפרתנוגנזה בכנימות עלים ואת הרגנרציה בנבוביים ובתולעים טבעתיות. ניסה להוכיח מציאות חושים בצמחים. דחה את רעיון האפיגנזה ודגל בהיווצרות-מוקדמת.

בופון, ז'ורז' לואי לקלרק דה Buffon, George Louis Leclerc Comte de (1707-1788) חוקר-טבע צרפתי. פירסם את עבודותיו ב-44 כרכים של 'לימודי הטבע'. היה הראשון שהחל בפיתוח רעיון האבולוציה בביולוגיה ובהתפתחות כדור-הארץ מכדור נוזל ועד הופעת האדם. העלה סברה על היווצרות כדור-הארץ מהתנגשות כוכב שביט בשמש.

בורלי, אלפונסו ג'ובאני Borelli, Alfonso Giovanni (1608-1678) רופא, מתמטיקאי ופיסיקאי איטלקי. הסתמך על

שיקולים פסיקליים ומתמטיים בחיבוריו ובניתוחיו על תנועת בעלי־החיים. בספרו על כוכב השביט (1664) הביע לראשונה את ההשערה שמסלול כוכבי השביט הוא פרבולי.

ביכנר, אדוארד Büchner, Edouard

(1860-1917) ביוכימאי גרמני. זכה בפרס נובל בכימיה ב-1907 בזכות מחקריו בתסיסת פחמימות. הראה שתסיסה זו גובעת מפעולתם של אנזימים שונים המצויים במיץ השמר ובתא השמר עצמו.

בישה, מארי פרנסואה קסאויה Bichat, Marie François Xavier
(1771-1802) אנטומאי ופיסיולוג צרפתי. מחקריו השיטתיים באדם תרמו לביסוסה של ההיסטולוגיה.

בלביאני, אדוארד Balbiani, Eduard

(1825-1899) זואולוג צרפתי. עבד על יצורים מיקרוסקופיים, אינפוזוריות, ביציות של חרקים ועוד.

בלון, פייר Belon, Pierre

(1517-1564) רופא וחוקר־טבע צרפתי. רשימות ממסע מחקר שערך בארצות הים התיכון כוללות פרטים חשובים על הצומח והחי בארצות אלו. עיקר תרומתו לתולדות המדע מצוי בחיבורו על הדגים והציפורים, אשר בו הונחו עקרונות היסוד של האנטומיה המשווה.

בנדן, אדוארד ון Benden, Edouard van

(1846-1910) אמבריולוג וציטולוג בלגי. מוכר ביותר על מחקריו בהפריה. במחקריו בתולעת המעייים (Ascaris) הראה שההפריה מורכבת מאיחוד שני תצאי גרעין – חצי מן הזכר וחצי מן הנקבה – שכל אחד מכיל את מחצית מספר הכרומוזומים שבתאי הגוף האחרים. מאוחר יותר פיתח תיאוריה על יצירת העובר ביונקים.

בראון, רוברט Brown, Robert

(1773-1853) בוטנאי סקוטי. תיאר את התנועה המתמדת של

גיבס, יאשיה וילרד Gibbs, Josiah Willard (1839-1903) פיסיקאי תיאורטי וכימאי אמריקאי. נחשב אחד מגדולי המדענים בחלקה האחרון של המאה ה-19.

גליליי, גלילאו Galilei, Galileo (1564-1642) פיסיקאי, אסטרונום ופילוסוף איטלקי. קבע את חוקי הנפילה החופשית והמטוטלת. נאבק על תפישתו של קופרניקוס כי הארץ געה סביב השמש, אך לאחר שהעמידה אותו האינקוויזיציה למשפט, כפר בתפישה זו.

גראף, רנייה דה Graaf, Regnier de (1641-1673) רופא, אנטומאי ופיסיולוג הולנדי. גילה את דרכי ההפרשה החיצונית של הלב, עוד בהיותו סטודנט. עסק באנטומיה משווה. ידוע בעיקר בזכות מחקריו על איברי ההולדה באדם ובבעלי-חיים אחרים.

גרהרד, שרל פודריק Gerhardt, Frederic Charles (1816-1856) כימאי צרפתי. פיתח יחד עם אוגוסט לורן את שיטת המיון של תרכובות אורגניות.

גרו, נחמיה Grew, Nehemiah (1641-1721) בוטנאי ורופא אנגלי. מיקרוסקופיסט שנחשב יחד עם המיקרוסקופיסט מאלפיגי בין מייסדי האנטומיה של הצמח.

גרטנר, קרל פרידריך פון Gärtner, Carl von Friedrich (1772-1850) רופא גרמני. פרופ' לרפואה באוניברסיטת טיבינגן.

גתה, יוהאנס וולפגנג Goethe, Johannes Wolfgang (1749-1832) נושורר והוגה-דעות, מגדולי אנשי-הרוח בגרמניה ובעולם בתקופה הרומנטית, ובכלל. כתב בין השאר ספרי מסעות ומחקרים במדעי הטבע.

דארוין, ארסמוס Darwin, Erasmus (1731-1802) רופא, חוקר, הוגה-דעות ומשורר אנגלי. סבו של

ברנאר, קלוד Bernard, Claude

(1878-1813) פיסיולוג צרפתי. ממניחי היסוד לביולוגיה הניסויית ומחלוצי החשיבה הביולוגית המודרנית. טבע את אחד ממושגי היסוד הביולוגיים 'סביבה פנימית'.

ברנולי, דניאל Bernoulli, Daniel

(1782-1700) בן דור שני של משפחת מתמטיקאים שווייצרים. חקר גם בשטחי רפואה, ביולוגיה, פיסיולוגיה, מכניקה, פיסיקה, אסטרונומיה ואוקיאנוגרפיה. פיתח וביסס את תיאוריית הזרימה בנוזלים. הציע את עקרון ברנולי, האומר שלחץ הנוזל יורד ככל שמהירותו עולה. זכה בפרסים רבים של האקדמיה המדעית של פריס בשטחים שונים.

ברתלו, מרסלן Berthelot, Marcelin

(1907-1827) כימאי צרפתי. עסק בכימיה אורגנית ופיסיקלית. היסטוריון של המדע, ואיש המימשל. חשיבתו ומחקריו היצירתיים תרמו להתפתחות הכימיה במחצית השנייה של המאה ה-19.

ג'אול, ג'יימס פרסקוט Joule, James Prescott

(1889-1818) פיסיקאי אנגלי. ידוע בעיקר על קביעת היחס בין חום לעבודה מכנית. על שמו יחידת האנרגיה ג'אול.

גאלנוס, קלאודיוס Galenos, Claudios

(129-199 לפנה"ס) רופא יווני מהידועים בעת העתיקה. ייסד את הפיסיולוגיה הניסויית. השפעתו על התיאוריה והפרקטיקה הרפואית שלטו באירופה עד שלהי ימי הביניים ובמשך תקופת הרנסנס.

גדל, קורט Gödel, Kurt

(1978-1906) מתמטיקאי לוגיקן, יליד אוסטריה. בשנת 1940 היגר לארצות-הברית. גיסח את הטענה הקרויה על שמו, שעל-פיה במערכת מתמטית-לוגית נוקשה יש הנחות ושאלות שלא ניתן להוכיחן או לשלול על בסיס האקסיומות של אותה מערכת.

דקארט, רנה Descarts, René

(1596-1650) מתמטיקאי ופילוסוף צרפתי. נחשב למחולל הרציונליזם והמתמטיקה החדשה. המציא את הגיאומטריה האנליטית. נלחם בסכולסטיקה, ובחיפושיו אחר האמת הטיל ספק בכול, למעט ה'אני' שלו.

דריש, הנס Driesch, Hans

(1867-1941) אמבריולוג ניסויי ופילוסוף גרמני. נחשב לאחרון גדולי המצדדים בוויטליזם.

האלר, אלברכט פון Haller, Albrecht von

(1708-1777) ביולוג שווייצרי. מאבות הפיסיולוגיה הניסויית.

האקסלי, תומס הנרי Huxley, Thomas Henry

(1825-1895) חוקר־טבע אנגלי (סבם של אלדוס וג'וליאן). חברו ותומכו הנלהב של דארווין. במחקריו הראה את הקירבה האבולוציונית שבין האדם לקופים המפותחים.

הארווי, ויליאם Harvey, William

(1578-1657) רופא ופיסיולוג אנגלי. אימץ את השיטה הניסויית לפתרון בעיות ביולוגיות. ביסס את הידיעה על מהלכו של מחזור־הדם בעזרת ניסויים בבעלי־חיים שונים.

הובס, תומס Hobbes, Thomas

(1588-1679) פילוסוף אנגלי. מטריאליסט־מכניסט, שלדעתו המציאות מורכבת מחומר ותנועה בלבד. שיטתו הפילוסופית־מדינית נובעת מהתפישה שהמצב הטבעי של החברה הוא 'מלחמת הכול בכול', ומכאן, שבגיה־האדם פועלים יחד במדינה כדי להימנע ממלחמה כוללת.

הולדיין, ג'ון סקוט Haldane, John Scott

(1860-1936) פיסיולוג אנגלי. מוכר בעיקר ממחקריו על חילוף גזים בנושימה.

צ'רלס דארוין. בחיבורו 'תורת חוקי החיים', על התפתחות והשתלמות של צורות החיים, ניתן למצוא רמז מוקדם לתורת הברירה הטבעית של נכדו. אולם האחרון פסל את תורת סבו כ'לאמאריקיסטית'.

דארוין, צ'רלס רוברט Darwin, Charles Robert (1809-1882) חוקר טבע אנגלי, מן המפורסמים ביותר. ניסח את חוקי ההתפתחות של הטבע האורגני – האבולוציה – בדרך של 'ברירה טבעית'.

דובנטון, לואי Daubenton, Louis (1716-1800) חוקר טבע צרפתי. חלוץ בשטחי האנטומיה והפליאונטולוגיה המשוות.

דו'רדן, פליקס Dujardin, Felix (1801-1860) ביולוג וציטולוג צרפתי. ידוע ממחקריו על מיון חד-תאיים וחסרי-חוליות.

דולבק, פול-אנרי תירי d'Holbach, Paul-Henri Thiry (1723-1789) פילוסוף צרפתי ממוצא הונגרי. מראשי המטריאליסטים במאה ה-18. ערך עם דידרו את ה'אנציקלופדיה'. בספרו 'שיטת הטבע' (1770) התנגד לגישה שלפיה מחולק העולם לחומר ורוח.

דומא, ז'אן-בטיסט Dumas, Jean-Baptiste (1800-1884) כימאי צרפתי. מחלוצי הכימיה האורגנית, במיוחד האנליטית.

דידו, דני Didero, Denis (1713-1784) פילוסוף וחוקר צרפתי. מראשי האנציקלופדיסטים והמטריאליסטים בזמנו, ועורך ראשי של ה'אנציקלופדיה'. ממבשרי רעיון התפתחות האורגניזמים וקיומו של 'יצור ראשוני' שממנו התפתחו כל היצורים האחרים.

הרטסוקר, ניקולס Hartsoeker, Nicolas (1725-1656) רופא הולנדי. שיפר ושיכלל את המיקרוסקופ, שבעזרתו גילה את הספרמטוזואידים.

ואלאס, אלפרד וואסל Wallace, Alfred Russell (1913-1823) חוקר־טבע אנגלי. פיתח, באותה עת עם דארווין ובאופן בלתי־תלוי בו, את התיאוריה על מוצא המינים בדרך של ברירה טבעית. טבע את המשפט הידוע על 'הישרדות המותאמים'.

וודוורד, ג'והן Woodward, John (1728-1665) פרופסור לרפואה וחוקר־טבע אנגלי. אירגן את אוסף המאובנים על־פי סדר השכבות.

והלר, פרידריך Wohler, Friedrich (1882-1800) כימאי גרמני. סינתזו לראשונה תרכובת אורגנית (אוריאה) מחומר אי־אורגני (1828).

וולטיר, פרנסוא מרי ארואה Voltaire, François Marie Arouet (1778-1734) היסטוריון, משורר ופילוסוף צרפתי. נציג ראשי של תנועת ההשכלה, מראשי האנציקלופדיסטים ולוחם למען זכויות האדם. הוקיע את עריצות האבסולוטיזם והיה נרדף בצרפת. נאסר ואולץ לעזוב את פריס, והשתקע בשווייץ.

וולף, קספר פרידריך Wolff, Caspar Friedrich (1794-1733) אנטומאי ואמבריולוג גרמני. ממניחי היסוד של האמבריולוגיה החדשה. חידש באורח שיטתי את תורת האפיגנזה של ההתפתחות, ברוחו של אריסטו שמשנתו האמבריולוגית נשתכחה מאז.

וויסמן, אוגוסט Weismann, August (1914-1834) ביולוג גרמני. ממניחי היסוד של מדע הגנטיקה. ידוע במיוחד בשל התנגדותו לדוקטרינה של הורשת תכונות נרכשות ועל תיאוריית ה-germ plasm שלו, שקדמה לתיאוריית ה-DNA.

הומבולדט, אלכסנדר פון Humboldt, Alexander von (1769-1859) חוקר־טבע ומגלה ארצות גרמני. מהדמויות המרכזיות בתקופה הקלאסית של הגיאוגרפיה הפיסית והביו־גיאוגרפיה.

הוק, רוברט Hooke, Robert (1635-1703) פיסיקאי אנגלי. חלוץ השימוש במיקרוסקופ, גילה את המבנה התאי של השעם. ראשון שהגדיר את החום כתנועה של פרודות קטנות. המציא יחד עם הויגנס את המטוטלת הקפיצית שבשעון.

היפוקרטס Hippocrates (460-370 לפנה"ס) רופא יווני, אבי הרפואה הקלאסית. מיוחסים לו כתבים רבים, אשר אין ספק שלא את כולם כתב. על שמו שבוטע הרופא הנהוגה עד היום.

הלמהולץ, הרמן פון Helmholtz, Hermann von (1821-1894) מדען ופילוסוף גרמני. הניח את הבסיס הפיסיקלי לחקר הראיה והשמיעה. תרם לחקר האלקטרודינמיקה והמטאורולוגיה.

הקל, ארנסט היינריך Haeckel, Ernst Heinrich (1834-1919) ביולוג ופילוסוף גרמני, ממפרסמי תורת דארוין. הראה שבהתפתחותו של כל פרט (אוניטוגנזה) יש חזרה של תולדות גזעו (פילוגנזה). פיתח את המטריאליזם המוניסטי, המאמין באחדות החומר האורגני והאי־אורגני.

הרטויג, אוסקר Hertwig, Oscar (1849-1922) אמבריולוג וציטולוג גרמני. הראשון שגילה כי איתוי של גרעיני תא הזרע ותא הביצה חיוני להפריה.

הרטויג, ריכרד Hertwig, Richard (1850-1937) ביולוג גרמני. ידוע במיוחד על פיתוח תיאוריית שכבות הנבט בעובר המתפתח.

ז'ופרואה, אטיין Geoffroy, Etienne (1731-1672) כימאי צרפתי. הראשון שדיבר על זיקה במונחים של משיכה קבועה בין גופים שונים.

Geoffroy Saint-Hilaire, Etienne ז'ופרואה סנט הילר, אטיין (1844-1772) חוקר טבע צרפתי. ביסס את העיקרון של 'אחידות ההרכב', המניח שקיימת תוכנית מבנה בסיסית משותפת לכל בעלי החיים. תוכנית זו שימשה בסיס לאנטומיה המשווה. כשניסה ליישם את התיאוריה שלו לחסרי-חוליות (1830), התעורר ויכוח קשה עם קוביה, שחילק את בעלי-החיים לארבע קבוצות שאין ביניהן מעבריים של שחלוף. ייסד את ענף הטריטולוגיה (חקר פגמים בבעלי-חיים).

Geoffroy Saint-Hilaire, Isidore ז'ופרואה סנט הילר, איזידור (1861-1805) זואולוג צרפתי. ידוע על מחקריו באנומליות אנטומיות באדם ובבעלי-חיים ירודים.

Siebold, Carl Theodor Ernst von קרל תיאודור ארנסט פון זיבולד, (1885-1804) זואולוג גרמני. התמחה בחקר חסרי-חוליות ותרם באופן בולט להתפתחות הפרזיטולוגיה.

Tournefort, Joseph Pitton de טורנפור, ז'וזף פיטון דה (1708-1656) בוטנאי ורופא צרפתי. היה חלוץ בסיווג צמחים. שיטתו היתה צעד חשוב בזמנו, ונשארה תקפה במידה מסוימת עד ימינו.

Treviranus, Gottfried Reinhold טרבירנוס, גוטפריד ריינהולד (1837-1776) ביולוג, רופא ומתמטיקאי גרמני. עסק באנטומיה משווה, פירסם ספרים. בספרו 'פילוסופיה של הביולוגיה' טיפל באמבריולוגיה וכבר בו ניכרים ניצנים של תיאוריית האבולוציה.

Johannsen, Wilhelm Ludvig יוהאנסן, וילהלם לודוויג (1927-1857) בוטנאי וגנטיקאי דני. ניסוייו בתורשה אצל צמחים חיזקו את תיאוריית המוטציות של הבוטנאי ההולנדי דה-פריס.

ויליס, תומס Willis, Thomas

(1621-1675) רופא אנגלי. חקר בעיקר את מערכת העצבים, ולו מייחסים את טביעת המונח 'נאורולוגיה'. מייסדי האנטומיה המשווה.

וינר, נורברט Wiener, Norbert

(1894-1964) מתמטיקאי אמריקאי. יסד את מדע הקיברנטיקה, העוסק בגורמי הבקרה והתקשורת ביצורים חיים, מכוונות אוטומטיות ומערכות מאורגנות.

ויק ד'אזיר, פליקס Vicq d'Azyr, Felix

(1748-1794) רופא ואנטומאי צרפתי. יסד יחד עם לסון את החברה המלכותית הצרפתית לרפואה ב-1776. עבודתו הקיפה רפואה, וטרינריה ואנטומיה, שבמהלכה השווה את האנטומיה של בעלי-חיים ושל בני-אדם.

וירכוב, רודולף Virchow, Rudolf

(1821-1902) רופא ומדינאי גרמני. יסד את ענף הפתולוגיה התאית, והיה בעל אוסף גדול של תתקינים פתולוגיים. התיאוריה שלו על התנגדות התאים לפולשנות ולפגיעות שינתה בצורה בולטת את דרך ההסתכלות הפתולוגית ואת הבנתה של תופעת הדלקות. עזר לביסמרק ב'מלחמת התרבות' שניהל.

ולדאיאר, וילהלם Waldeyer, Wilhelm

(1836-1921) אנטומאי, פתולוג ואמבריוולוג גרמני. ידוע בעיקר על מחקריו בבלוטות המין, ותיאורן.

וסאליוס, אנדריאס Vesalius, Andreas

(1514-1564) רופא ואנטומאי פלמי. ב-1543 פירסם בבאזל ספר אנטומיה 'מבנה גוף האדם'. בספר יש 300 חיתוכי-עץ אמנותיים, שהוכנו בדיוק רב על-פי ניתוחים.

ז'וסייה, אנטואן לורן דה Jussieu, Antoine de Laurent

(1748-1836) בוטנאי צרפתי. פיתח את העקרונות ששימשו בייסוד מערכת טבעית של מיון צמחים.

לורן, אוגוסט Laurent, August (1807-1853) כימאי צרפתי. עסק בחקר המבנה של תרכובות אורגניות.

לורנץ, קונרד Lorenz, Konrad (1903-1991) זואולוג אוסטרי. ממייסדי האתולוגיה המודרנית – חקר התנהגות בעלי-חיים בשיטות השוואתיות. מוכר גם על מחקריו במקורות התוקפנות. קיבל את פרס נובל בפיסיולוגיה ורפואה ב-1973 יחד עם טינברגן ופון פריש.

ליביג, יוסטוס von Liebig, Justus (1803-1873) כימאי גרמני. תרם רבות לסיסטמטיזציה המוקדמת של הכימיה האורגנית וליישום הכימיה בביולוגיה (ביוכימיה).

לייבניץ, גוטפריד וילהלם Leibnitz, Wilhelm Gottfried (1646-1716) מתמטיקאי, מדינאי, היסטוריון, תיאולוג ופילוסוף גרמני. ממייסדי האקדמיה למדעים בברלין. המציא באורח בלתי-תלוי בניוטון את החשבון הדיפרנציאלי ופיתח מכונת חישוב.

לייל, צ'רלס Lyell, Charles (1797-1875) גיאולוג סקוטי. מוכר במיוחד על חלקו בקבלת התפישה שכל המופעים שעל פני כדור-הארץ נוצרו בתהליכים פיסיקליים, כימיים וביולוגיים במהלך תקופות גיאולוגיות ממושכות.

ליניאוס, קרל von Linnaeus, Carl (1707-1778) רופא ובוטנאי שבדי. הניח את היסודות לשיטת המיון הבינארית של עולם הצומח והחי. קבע את שיטת השימוש בשני שמות לכל יצור (סוג ומין).

מאיה, בנואה de Maillet, Benoit (1656-1738) דיפלומט ונוסע צרפתי. ספר מסעותיו, *Telliamed*, פורסם ב-1748. הבחין בין השאר ששיכוב הסלעים הוא שקיעת חומרים במשך זמן רב.

לאמארק, ז'אן־בטיסט דה מונה, שוואליה דה Lamarck, Jean-Baptiste de Monet, Chevalier de (1829-1744) ביולוג צרפתי. חלוץ תורת ההתפתחות של דארווין. הניח שהתנאים החיצוניים המשפיעים על מבנה גופם של בעל־חיים מכוונים גם את דרך התפתחות צאצאיהם.

לאפלאס, פייר סימון המרקוז דה Laplace, Pierre Simon Marquis de (1827-1749) מתמטיקאי ואסטרונום צרפתי. הציע את תיאוריית הערפילית על התהוות מערכת השמש. התיאוריה פותחה על־ידי הפילוסוף עמנואל קאנט, אך כיום איננה עומדת עוד בפני הביקורת המדעית.

לב, ז'אק Loeb, Jacques (1924-1859) ביולוג אמריקאי יליד גרמניה. ידוע בעיקר על עבודתו הניסויית בפרתנוגזה מלאכותית.

לבואזיה, אנטואן־לורן דה Lavoisier, Antoine-Laurent de (1794-1743) כימאי צרפתי. חקר את הבעירה ותפקיד החמצן בתהליך זה. ניסח את חוק שימור החומר והניח את היסודות לחקר הכימיה. הומת על הגרדום בימי הטרור לאחר המהפכה הצרפתית.

לבנהוק, אנטון ון Leeuwenhoek, Anton van (1723-1632) חוקר־טבע הולנדי. התפרסם במיוחד כממציא המיקרוסקופ.

לה מטרי, ז'וליאן אופרואה דה La Mettrie, Julien Offroy de (1751-1709) רופא ופילוסוף צרפתי. כנציג מובהק של האתאיזם והמטריאליזם של המאה ה-18, הצהיר כי הנשמה חדלה עם חדלון הגוף, וכי רצוי שהאדם יתענג כל עוד הוא חי. טען שטעות לחשוב שהחומר מקבל צורה ותנועה ממקור חיצוני בלתי־חומרי. לכתביו נודעת חשיבות גם בתחום הביולוגיה המשווה.

מילר, הרמן יוסף Muller, Hermann Joseph (1890-1967) גנטיקאי אמריקאי. הראה שקרני X יכולות לגרום לשינויים מוטציוניים ותורשתיים. גילה שניתן להשרות מוטציות בדרך מלאכותית, דבר שהיו לו השלכות מרחיקות-לכת. זכה בפרס נובל בפיסיולוגיה ב-1946.

מלבראנש, ניקולה דה Malebranche, Nicolas de (1638-1715) פילוסוף צרפתי. נחשב למטפיסיקן הגדול לאחר דקארט. הסיק מתורתו של דקארט על הפרדת הגוף והנפש, מסקנה המנוגדת לזו של דקארט.

מנדל, יוהאן גרגור Mendel, Johann Gregor (1822-1884) נזיר-ביולוג מבוהמיה. נחשב לאבי הגנטיקה. עסק בהכלאת זני אפונה בגן המנזר, עיבד את הנתונים בשיטה סטטיסטית וניסח על-פי מימצאיו את חוקי התורשה. מימצאיו שפורסמו כבר ב-1868 לא הובנו ולא הוערכו, אלא רק בתחילת המאה ה-20.

מניול, פייר Magnol, Pierre (1638-1715) בוטנאי צרפתי. תרם לתורת המיון בצמחים והצביע על הקירבה בין מינים שונים, כלומר, שטווח המרחק בין משפחות שונות בצמחים דומה לטווח שבין משפחות בעלי-חיים.

מקסוול, ג'יימס קלרק Maxwell, James Clerk (1831-1879) פיסיקאי אנגלי. ניסח את התיאוריה האלקטרומגנטית. יש המעמידים אותו בשורה אחת עם ניוטון בזכות החשיבות הבסיסית של תרומתו המדעית.

נאודין, שארל Naudin, Charles (1815-1899) ביולוג צרפתי. חקר תופעות תורשתיות.

נגלי, קרל וילהלם פון Nägeli, Karl Wilhelm von (1817-1891) בוטנאי שווייצרי. התפרסם בזכות מחקריו בפיסיולוגיה וגנטיקה של תאי צמחים.

מאלפיגי, מרצ'לו Malpighi, Marcello (1628-1694) אנטומאי איטלקי. מהראשונים שהשתמש במיקרוסקופ בחקירותיו. השלים את תגליותיו של הארווי על מחזור-הדם. תיאר את המבנה של רקמות רבות.

מאלתוס, תומס רוברט Malthus, Thomas Robert (1766-1834) כלכלן ודמוגרף אנגלי. פיתח תיאוריה על הקשר בין גידול האוכלוסיה לקצב גידול המזון. מסקנתו: הטבת מצב האנושות מחייבת הגבלת הילודה.

מוהל, הוגו פון Mohl, Hugo von (1805-1872) בוטנאי ורופא גרמני. מוכר בזכות מחקריו באנטומיה ופיסיולוגיה של תאים צמחיים.

מונטיין, מישל אקוּם דה Montaigne, Michel Eyquem de (1533-1592) הוגה-דעות צרפתי. חיבר מסות שהיו צורה ספרותית חדשה. המסות משקפות רוח ספקנית וחינוך לטיני קלאסי, ומטפלות בחיים ובאידיאלים של הדמויות הבולטות בתקופה.

מונטסקיה, שארל דה סקונדה Montesquieu, Charles de Secondat (1689-1755) הוגה-דעות וסופר מדיני צרפתי. נלחם לחופש אזרחי ודתי. הוגה רעיון ההפרדה השלטון לשלוש רשויות.

מופרטואי, פייר מורו דה Maupertuis, Pierre Moreau de (1698-1759) מתמטיקאי ואסטרונום צרפתי. ניסח לראשונה את הרעיון על עקרון הפעולה המינימלית (least action).

מורגן, תומס הנט Morgan, Thomas Hunt (1866-1945) זואולוג וחוקר תורשה אמריקאי. קבע את מיקום התכונות התורשתיות בגנים. זכה בפרס נובל ברפואה ב-1938.

מיישר, פרידריך Miescher, Friedrich (1844-1895) חוקר שווייצרי. חקר מסלולים מטבוליים. גילה את חומצות-הגרעין.

סילארד, ליאו Szilard, Leo

(1898-1964) פיסיקאי יהודי יליד הונגריה. פיתח באנגליה את השיטה הראשונה להפרדת איזוטופים. ב-1973 עבר לארצות-הברית. יחד עם אדוארד טלר וויגנר כתב לאיינשטיין שיפנה לנשיא רוזבלט בעניין פיתוח פצצת הגרעין. בעקבות הטלת הפצצה הראשונה, יום דחף לפיקוח גרעיני בינלאומי, ולפיתוח השימוש באנרגיה גרעינית לצורכי שלום.

ספאלאנצאני, לצרו Spallanzani, Lazzaro

(1729-1799) ביולוג איטלקי, מחשובי חוקרי הטבע במאה ה-18. סתר את התיאוריה המקובלת על היווצרות ספונטנית של בעלי-חיים. בפיסילוגיה, הראה כי תנועת הדם, הנגרמת על-ידי פעימות הלב, מגיעה עד להסתעפויות האחרונות של העורקים.

ספנסר, הרבויט Spencer, Herbert

(1820-1903) סוציולוג ופילוסוף אנגלי. מראשוני התומכים הפעילים של תיאוריית האבולוציה. צידד ביתרונו של היחיד על פני החברה ושל המדע על פני הדת. ספרו *The Synthetic Philosophy*, שהושלם ב-1896, מסכם את רעיונותיו בנושאים שונים: ביולוגיה, פסיכולוגיה, מוסר וחברה.

פאלאס, פטר סימון Pallas, Peter Simon

(1741-1811) חוקר-טבע גרמני. פיתח תיאוריה על היווצרות ההרים. בהיותו בן 15 הציע דרכי מיון חדשות לקבוצות מסוימות של בעלי-חיים. למד באנגליה והיה פרופסור בסנט פטרסבורג.

פאראצלסוס, תיאופרסט בומבסט פון הוהנהיים Paracelsus,

Theophraste Bombaste von Hohenheim

(1493-1541) רופא ואלכימאי גרמני. ביסס את תפקיד הכימיה ברפואה והיה חלוץ הכימותרפיה. כתב את 'ספר הניתוח הגדול' (1536). כבר ב-1530 פירסם תיאור קליני של מחלת העגבת. נסע ברחבי אירופה ולימד בכמה אוניברסיטאות, כי לדעתו 'רופא צריך לערוך מסעות... ידע הוא גיסיון'.

נידהם, ג'ון טרברויל Needham, John Turberville (1781-1713) חוקר־טבע אנגלי. הקתולי הראשון שנבחר לחברה המלכותית למדעים. חקר את האנימלקולים. פעל להוכחת התיאוריה של בריאה ספונטנית.

ניוטון, אייזק Newton, Isaac (1717-1643) מתמטיקאי, פיסיקאי, אסטרונום ופילוסוף אנגלי. גילה את כוח המשיכה, וניסח את חוקיו. עסק באור ובטלסקופיה. מגדולי המדענים בכל התקופות. היה נשיא החברה המלכותית למדעים בלונדון.

סגן, ארמן Seguin, Armand (1835-1767) כימאי ותעשיין צרפתי. המציא תהליך לעיבוד עור. היה בנקאי של נפוליאון ונאסר יחד עמו.

סוואמרדם, יאן Swammerdam, Jan (1680-1637) חוקר־טבע הולנדי. נחשב לדייקן ביותר בין המיקרוסקופיסטים הקלאסיים. ב-1658 היה הראשון שצפה בתאי דם אדומים ותיאר אותם.

סטור, גוטליב קונרד Storr, Gottlieb Konrad (1821-1749) רופא גרמני. פרופסור לרפואה, כירורגיה, בוטניקה ותולדות־הטבע באוניברסיטת טיבינגן. אחד מספריו עוסק במדידות כמותיות בהיסטולוגיה ובחקר מאובנים.

סטורטבנט, אלפרד הנרי Sturtevant, Alfred Henri (1970-1891) גנטיקאי אמריקאי. פיתח ב-1913 שיטה למיפוי מקומם של גנים בכרומוזום של זבוב הפירות (דרוזופילה).

סטנו, ניקולס Stenon, Nicolas (1687-1638) אנטומאי וגיאולוג דני. גילה ותיאר את התעלה שדרכה זורם הריר, הנקראת על שמו. מהראשונים שהכירו בחשיבות השיכוב ומיקום המאובנים בגיאולוגיה. הניח את הבסיס לכרונולוגיה הגיאולוגית. חקר ופיתח את תורת הטקטוניקה.

פסטר, לואי Pasteur, Louis

(1822-1895) כימאי וביולוג צרפתי. אבי המיקרוביולוגיה המודרנית. ביסס את הקשר בין חיידקים ובין התפתחות מחלות בקטריאליות. פיתח שיטות חיסון נגד גחלת בכבשים ונגד כלבת. חקר את תהליך התסיסה ופיתח את שיטת הפיסטור להשמדת חיידקים, הקרויה על שמו.

פסקל, בלז Pascal, Blaise

(1623-1662) מתמטיקאי ופילוסוף צרפתי. בן 17 פירסם חיבור חשוב על חתכי החרוט. המציא מכונת חישוב. ניסח חוק, הקובע שהלחץ בנוזל מתפשט במידה שווה בכל הכיוונים; חוק הקרוי על שמו. סגנון 'אגרותיו' נחשב למופת לסגנון כתיבה צרפתי בן-הזמן.

פראן, ז'אן-בטיסט Perrin, Jean-Baptiste

(1870-1942) פיסיקאי צרפתי. חקר קולואידים, משקלים מולקולריים מוחלטים ותנועת בראון. זכה בפרס נובל בפיסיקה ב-1926.

פרו, קלוד Perrault, Claude

(1613-1688) רופא וארכיטקט צרפתי. מעצב חזית האגף המזרחי של הלובר, דוגמה ראשונה למה שמוכר כסגנון לואי ה-14. סקרנותו המדעית לא ידעה שבעה. מותו מיוחס למחלה שנדבק בה בעת שניתח גמל.

פרידריך וילהלם Friedrich Wilhelm

(1688-1740) מלך פרוסיה מ-1713. בעיניו, המשטר, המדינה, הצבא והאזרחים חד הם.

פריס, הוגו דה Vries, Hugo de

(1848-1935) בוטנאי וגנטיקאי הולנדי. הכניס את הגישה הניסויית למחקר הביולוגי. היה בין אלה שגילו מחדש את עבודתו הקלאסית של מנדל, וחיוק את הקשר בין מוטציות לגיוון המינים.

פארה, אמברואז Paré, Ambroise

(1510-1599) מנתח צרפתי. החל כשוליה של גלבים, קנה את ראשית פרסומו כמנתח צבאי, וברבות הימים נחשב למנתח חשוב. היה חסר השכלה רפואית, אך בכל זאת שירת בחצרם של ארבעה מלכים.

פונטל, ברנאר לה בוביה דה Fontenelle, Bernard le Bovier de

(1657-1757) מדען ואיש־רוח צרפתי. וולטיר תיאר אותו כרוח האוניברסלית ביותר שקמה בתקופת לואי ה-14.

פורטה, ג'ובאני־בטיסטה דלה Porta, Jean-Baptiste della

(1534-1615) פילוסוף איטלקי של מדעיה־טבע. הראשון שהכיר בתוצא החומני של קרני האור. יסד שתי אקדמיות, שזוכאו אחר־כך בידי האינקוויזיציה. ערך מסעות רבים באיטליה ובצרפת. חיבר את הטובות שבקומדיות האיטלקיות בזמנו.

פורקינייה, יאן Purkinje, Jan

(1787-1869) חלוץ הפיסיולוגיה הניסויית בצ'כיה. מחקריו בהיסטולוגיה, אמבריולוגיה ופרמקולוגיה תרמו להבנת העין והראיה, תיפקוד המוח והלב, רביית יונקים והרכב התאים.

פינל, פיליפ Pinel, Philippe

(1745-1826) רופא צרפתי. מחלוצי הטיפול בחולי נפש. דחה את הגושה הקושרת מחלות נפש ברוחות הנכנסות בבני־האדם. הבחין בין סוגים שונים של מחלות נפש, ומנה, נוסף על סיבות פיסיולוגיות ותורשתיות, גם לחצים חברתיים ופסיכולוגיים.

פלמינג, וולטר Fleming, Walter

(1843-1905) אנטומאי גרמני. מייסד ענף הציטוגנטיקה. הראשון שעקב ותיאר את התנהגות הכרומוזומים במהלך חלוקת־התא. השתמש בצבעי אנילין לוויזואליזציה של מבני התא, וכך צבע את הכרומוזומים וקבע אותם בשלבים שונים של חלוקת התא. השלכות מחקריו הוכרו רק לאחר שהובנו, 20 שנה מאוחר יותר, עקרונות עבודתו של מנדל.

קארדנו, הירוסום Cardano, Hierosome (1576-1501) רופא, מתמטיקאי ופילוסוף איטלקי. התיאוריה הרפואית שלו התבססה על אסטרולוגיה, ופילוסופיית הטבע שלו קיבלה את השראתה מאריסטו. מצא את הפתרון למשוואות מהמעלה השלישית.

קארנו, סדי Carnot, Sadi (1832-1796) פיסיקאי צרפתי. עסק בפיתוח תיאורטי של מכונות החום. על שמו מעגל קארנו.

קוביה, ז'ורז' Cuvier, Georges (1832-1769) זואולוג ומדינאי צרפתי. ביסס את האנטומיה והפליאונטולוגיה המשוות.

קולבה, הרמן Kolbe, Hermann (1884-1818) כימאי גרמני. בין הראשונים שהצליחו לסנתז תרכובת אורגנית מחומרים אי-אורגניים.

קונדיאק, אטיין בוזו דה Condillac, Etienne Bonnot de (1780-1715) פילוסוף, פסיכולוג, לוגיקן וכלכלן צרפתי. ממפיצי הרעיונות של ג'ון לוק בצרפת.

קונט, אוגוסט Comte, August (1857-1798) פילוסוף צרפתי. ידוע כמייסד הסוציולוגיה והאסכולה הפוזיטיביסטית בפילוסופיה.

קורן, קרל Correns, Carl (1933-1864) בוטנאי וגנטיקאי גרמני. בין החוקרים שגילו מחדש ב-1900 את עבודתו הקלאסית של מנדל בתורשה. בניסיון לאשר את תקפותם של חוקי מנדל, ערך עבודה קלאסית על תורשה לא מנדלית ב-Jalapa mirabilis. הציג באופן ברור את הדוגמה הראשונה של תורשה ציטופלסמטית.

פרנל, ז'אן Fernel, Jean

(1558-1497) רופא, אסטרונום ומתמטיקאי צרפתי. מדד וקבע את אורך המעלה במרידיאן. נחשב לאחד מגדולי הרופאים במאה ה-16, ואף כונה גאלנוס המודרני.

פרנקלין, בנג'מין Franklin, Benjamin

(1790-1706) מדינאי, איש מדע והוגה-דעות אמריקאי. מייסד החברה האמריקאית לפילוסופיה והספריה הציבורית הראשונה בארה"ב (1731). חבר הקונגרס וחבר בוועדת הניסוח של הכרזת העצמאות האמריקאית.

צסאלפינו, אנדריאה Cesalpino, Andrea

(1603-1519) רופא, פילוסוף ובוטנאי איטלקי. ביקש לבסס מיון צמחים על עקרונות פילוסופיים-תיאורטיים.

צ'רמק, אריך פון Tschermak, Erich von

(1962-1871) בוטנאי אוסטרי. אחד החוקרים שגילו מחדש את עבודתו הקלאסית של מנדל על מחקריו בתורשה.

קאבאניס, פייר-ז'אן-ז'ורז' Cabanis, Pierre-Jean-Georges

(1808-1757) פילוסוף ופיסיולוג צרפתי. טען שאפשר להסביר את כל התהליכים בגוף החי על בסיס חומרי.

קאנון, וולטר Cannon, Walter

(1945-1871) נאורולוג ופיסיולוג אמריקאי. הראשון שהשתמש בקרני X במחקר פיסיולוגי. חקר את תפקיד מערכת העצבים הסימפטית ופיתח את המושג הומאוסטזיס.

קאנט, עמנואל Kant, Emmanuel

(1804-1724) פילוסוף מטפיסיקאי גרמני. עבודתו השיטתית והמקפת על תיאוריית הידיעה, האתיקה והאסתטיקה השפיעה על פילוסופים רבים מאז זמנו, במיוחד על אסכולות פילוסופיות גרמניות אידיאליסטיות.

רובינה, ז'אן-בטיסט Robinet, Jean-Baptiste (1735-1820) פילוסוף צרפתי. בספרו 'הטבע' (1761) פיתח תיאוריה חומרנית וחושנית של הטבע.

ריי, ג'ון Ray, John (1627-1705) חוקר־טבע אנגלי. מחלוצי המדע במאה ה-17 וממניחי היסוד לסיסטמטיקה של החי והצומח. קבע את המין (species) כיחידת היסוד במיון.

רמאק, רוברט Remak, Robert (1815-1865) אמבריולוג ונאורולוג גרמני. גילה והעניק שמות לשלוש שכבות הנבט שבעובר המוקדם: אקטודרם, מזודרם ואנדודרם. גילה את תאי העצב שבלב, הקרויים על שמו. היה חלוץ השימוש בתרפיה חשמלית לטיפול במחלות עצבים.

שבּרל, מישל־אז'ן Chevreul, Michel-Eugene (1786-1889) כימאי צרפתי. החל בחקר הכימיה של השומנים.

שוואן, תיאודור Schwann, Theodor (1810-1882) פיסיולוג גרמני. ייסד את ההיסטולוגיה המודרנית בהגדירו את התא כיחידת היסוד של מבנה בעלי־החיים. חקר את התכווצות השריר ומבנה העצב, וגילה את פספוס שרירי השלד ואת מעטפת המיאלין של עצבי החולייתנים. טבע את מונח 'מטבוליזם' לשינויים החלים ברקמות חיות.

שטהל, גיאורג ארנסט Stahl, Georg Ernst (1660-1734) רופא וכימאי גרמני. פיתח את תיאוריית השריפה של הפלוגיסטון בתהליכים ביולוגיים, כגון נשימה, תסיסה ופירוק. התיאוריה שלטה במדע הכימיה כמאה שנה. תקופה מסוימת גם האמין באלכימיה ובאנימיזם.

שטובריאן, פרנסואה דנה דה Chateaubriand, François René de (1768-1848) סופר ודיפלומט צרפתי. מראשוני הכותבים הרומנטיקנים בצרפת.

קלאוזיוס, רודולף Clausius, Rudolph (1822-1888) פיסיקאי ומתמטיקאי גרמני. גיסת את החוק השני של התרמודינמיקה.

קלרזיטר, יוזף Koelreuter, Josef (1733-1806) ביולוג ובוטנאי גרמני. בין ראשוני החוקרים של המיניות בצמחים. יצר בני-כלאיים חדשים על-ידי הנחת אבקה מצמח אחד על-פני הצלקת של צמח אחר.

קמפר, פטרוס Camper, Petrus (1722-1789) אנטומאי וחוקר-טבע הולנדי. הראשון שניסה לקבוע את מידת האינטליגנציה על-פי מידת רוחב הפנים.

קקולה, אוגוסט פון סטראדוניץ Kekule, August von Stradonitz (1829-1896) כימאי גרמני. הניח את היסודות לתיאוריית המבנה המודרנית בכימיה אורגנית. למד תחילה ארכיטקטורה, אך בהשפעת ליביג עבר ללמוד כימיה. ב-1858 הראה שהפחמן הוא ארבע-ערכי וכי האטומים שלו יכולים להתקשר ליצירת שרשרות ארוכות. יתכן שידעיותו בארכיטקטורה תרמו לרעיונותיו בפיתוח תיאוריות מבניות.

ראומיר, רנה אנטואן פרשו דה Réaumur, René-Antoine Ferchault de (1683-1767) מדען ואנטומולוג צרפתי. קבע את סקלת התרמומטר הקרויה על שמו. שיפר טכניקות רבות בתעשייה ובכימיה. פירסם את מחקריו על החרקים בסדרה של ספרים, שהופיעו בשנים 1734-1742. ב-1710 מינה אותו לואי ה-13 לערוך סקר של אוצרות התעשייה והטבע בצרפת.

רדי, פרנצ'סקו Redi, Francesco (1626-1698) רופא, חוקר-טבע, סופר ומשורר איטלקי. נודע במאבקו כנגד תפישת אריסטו על מוצא החי, שדגלה בבריאה ספונטנית של יצורים פשוטים מחומר דומם. הוכיח כי זבובים מתפתחים רק מתוך ביצים שהוטלו.

מפתח השמות והעניינים

- אבולוציה (התפתחות) 19 30 149 151-155 175 182-199 205 211 214
220-222 226 234 238-239 241 243 244 244 272 288 292 305
311 312 315 326 332 334-339 341 344 347 348 349; וזמן 14; בסיס
187-188 321; ביולוגית וכימית 331; כיוון 334 343; מיניות ומוות –
תנאי האבולוציה 335-337; שלבים עיקריים 337-338; משמעות המושג
154 349-350
- אבולוציה (התיאוריה) 27 28 150; סיכום 29-30; גישה אבולוציוניסטית
ה-18 154-156 175; מדארוין והלאה 175 179 184-199 201 213
220 229 347
- ‘אבולוציה’ של ארגונים 149-150 175
‘אבולוציה’ של רעיונות 27
אב־טיפוס 156-157
אברי, אוסולד 288-289
אגודה אמריקאית לטיפוח בעלי־חיים 243
אדם: התפתחותו 346; וברירה טבעית 348 349; וביולוגיה 347-348;
והתכונה הגנטית שלו 344 348-349; ותורשה 348; ותרבות 347-349;
וניטור האבולוציה שלו 349
אדנסון, מישל 63 66; מצוטט 66
אוון, ריצ'רד 121
אוטומטון 52
אוכלוסיה (ואוכלוסיות): וסביבה 22; בתחרות 190; מאלתוס על התפתחות
191; חשיבות גודל 192-193
אוטוגנזה 150 176
אוסטוואלד, וילהלם: מצוטט, 259

שילה, קרל וילהלם Scheele, Carl Wilhelm (1786-1742) כימאי שבדי. צפה את גילוי החמצן על-ידי פריסטלי, וערך מחקרים חשובים רבים אחרים. אם כי לא עמדו לרשותו מעבדה ואמצעי מחקר גאותים אחרים, מספר החומרים החדשים שגילה מהווה כנראה שיא ללא מתחרה.

שליידן, מתיאס יעקוב Schleiden, Matthias Jakob (1881-1804) בוטנאי גרמני. היה שותף לניסוח תיאוריית התא, יחד עם שוואן. הכיר בחשיבות גרעין התא שהתגלה על-ידי רוברט בראון, והבין את הקשר שלו לחלוקת-התא. היה מראשוני המדענים הגרמנים שקיבלו את תיאוריית האבולוציה של דארוין.

שרדינגר, ארוין Schrodinger, Erwin (1961-1887) פיסיקאי אוסטרי. הרים תרומה חשובה לניסוח תיאוריית הגלים של החומר ושל יסודות מכניקת הקוואנטים. זכה בפרס נובל בפיסיקה ב-1933, יחד עם הפיסיקאי האנגלי דיראק.

- אנרגיה מינימלית 327
 אנתרופומורפיזם 334 53
 אסימטריה (מולקולרית) בטבע 256-255 266
 אסקריס 237 236-235
 אפיגנזה 146 141 100 84-83
 אקוונדנטה, גבריציז 69
 אקראיות (contingency) בעולם־החי 175 179 188 202 220 350; המאפיין
 העיקרי של האבולוציוניזם 179; דארווין וואלאס על 175
 ארגון (ארגוניזם) 32-33 50 93-150 201 271-273 274 277 326-327; תוכנית
 120-131; מבנה מסדר שני 105 164 201 231; 'אבולוציה' של 149-150
 175; אוניברסליות של 350-349
 אדיסטו 230 121 100 67 65 51 39 36
 ארכיטקטורה חבויה 108-102
 'אשכים' של הנקבה 72 73
 אשריכיה קולי (חיידק, ניתוח) 334 295-292
 אתאיזם, התנגדות ל- 55
 אתולוגיה 349 343 342

 באטלר, סמואל 239
 פון־באר, קרל־אונסט 146 143 142 143; מצוטט 142 143 146
 בארנט, תומס 152
 בוברי, תיאודור 236 235 237-235; מצוטט
 בוהר, נילס 284; מצוטט 269
 בולצמן, לודוויג 231 225 223-219 195 189
 בונה, שארל 81 50 81 84 86 88 90 97 154 156 157 172; מצוטט 50 63 81
 95 157
 בופון, ז'ורז'־לואי 141 137 135 132 128 96 102-95 90 84 81 54 31 29 27
 147 154 157-158 160 162 165 168 170 174 191 195 197 214 229
 310; מצוטט 50 54-55 63 66 68 69 84 90 95-96 99-102 147 153 154
 158-160; על פרטים־יחידים 69 90; 'רביה' 90; כתבים 90 152 157;
 'תבנית פנימית' 99-100; וטרנספורמיזם 160
 הבורא, ראה אלוהים
 בורלי, אלפונסו ג'ובאני: מצוטט 50-51
 ביוכימיה (כימיה ביולוגית וביוכימאים) 203 203 250 259-268 273; שני זרמים
 260-261
 ביולוגיה (וביולוגים; ראה גם ביוכימיה וחיים) 120 119 116-112 56 33-19

הלוגיקה של החי

- אוקן, לודוץ 107 135 138; מצוטט 135
אורגניזמים (גופים אורגניים; יצורים חיים) 30-31 36 55-56 64; שילוב 69;
השפעת הסביבה עליהם 148 157-159 169-171 317-318; השפעתם
עליה 160; פעולות-גומלין בינם לבינה 160 176-177 197-198 209-210
339 341-342; הסתגלותם אליה 170 (ראה גם הסתגלות); קונפליקט
בינם לבינה 189; שלושה סוגים 210-211; והחומר הגנטי 248;
ומקרומולקולות 279; היווצרות 328
אותות מיניים 344-345
אטומיסטים יוונים 51
איברים (של גופים אורגניים מאורגנים ובהם): תיאום ושילוב 102-104 106
109 123-125 128-129; ותיפקודים 102 105 106 109 110 132-133;
והטבע (החיצוני) 105-106; מיקום 130-131 147-148 149-150 176
210-211; מותאמים לאורגניזם 171-172; 'כבתי-חרושת' (ברנאר) 206
אידיופלסמה 238
איוזומרפוזם 275-276
איוזמריום (ואיוזמרים) 116 254 255 266 274
אינשטיין, אלברט 28
אינטגרון 325-350; אינדיבידואלי 325-345; תרבותי וחברתי 345-350
אלדרובאנדוס, יוליסס 36 38 43; ומפלצות 43
אלוהים כבורא ויוצר 36 39-48 52 79
אלכימיה (ואלכימאים) 41 55-58 118
אמבריולוגיה (ואמבריולוגים; ראה גם: תאים, ביציות, עוברים) 143 175
203-204 236; ניסויית 84
אנומליות (ראה גם מפלצות) 159 162; חקר 144; כללים 145
אנוזימים (ראה גם קטליזה) 250-269 281 287 297 303-304 309 318-320
327-329; מתן שם 262; ספציפיות 263 297; וסינתזה 318-319 320
ופילמור 299 320
אנטומיה (ואנטומאים) 95 103 124 133 134 138 203 204; משווה 122 124
125 127 143 147 175
אנטרופיה 216-218 219 221 275 277; ומידע 116 275
אניזום (ואנימיסטים) 52-53 55-56 111
אנלוגיה ואנלוגיות 95 103 121-123 125 127 129 176 197 203 204
אנרגיה (ראה גם כוח ויטלי) 115 215-224 251-252 263-265 267 273;
שימור 215-218 251 273; שחרור 251; אגירה, שחרור ושחלוף 264-265;
מקור (מהשמש) 264 274; מנשימה ותסיסה 265; אחסון 264 295;
אטומית 284

- ברירה טבעית 194-192 198-197 220 245 248 312-311 315 317 321 323
 (varieties) 327 330 333 334 341 347 348 349 350; וצורות חדשות
 190; דארווין על 192 193 198; וייסמן על 240
 ברנאר, קלוד 201 204-205 206 209 212 214; מצוטט 20 214-205
 ברנולי, דניאל 218
 ברטלו, מרסלן 114 201 253; מצוטט 253-255
- ג'אול, ג'יימס פרסקוט 218
 גאלנוס, קלאודיוס 36
 גבישים (ראה גם התגבשות) 278 282 283 299 306 310 321 330-329;
 גביש לא-מחזורי 278 300
 גדל, קורט 343
 'גורמי גדילה' 265
 גזים, חקר 218-219
 גיאולוגיה 153 177-182
 גיבס, יאשיה וילרד 189 195 219 220 222-223 225
 גליליאו, גליליי 48 51; מצוטט 45 47 50
 גנטי/גנטית: זיכרון (ראה זיכרון); חומר 25 246-249 287 288 289 314
 316; מטען 18 19; מידע 30 284 315; מסר (טקסט) 291-303 312-313
 317 318 322-323 331 337 345 346; ניתוח 286-292; פעילות 288-289;
 צופן 19 300-301 332; תוכנה (ראה תוכנה גנטית; התוכנה)
 גנטיקה (וגנטיקאים; ראה גם גנים) 203 242 243-244 247-249 250
 266-268 273 284 287-288 312 313; הולדת הגנטיקה 225-232;
 קלאסית 248; מטרה וכיוון 249; וכימיה 250 (ראה גם אנזימים);
 משותפת בכל עולם-החי 287
 גנים (ראה גם: כרומוזומים, אנזימים, גנטיקה) 30 33 201-209 286-290
 299 301-308 309; עריכת ניסויים 203-215; ניתוח סטטיסטי
 215-224; הולדת הגנטיקה 225-232; ריקוד הכרומוזומים 232-250;
 אנזימים 250-266; וחלבון 267; סינתזה של 320
 גנרציה 32 33 35-36 36-44 44-45 55 67 68 89 90 93 96-97 98; (בריאה)
 ספונטנית 17 27 29 40 70-72 101 140 172-173 240 257-258; ביטול
 התיאוריה 255; ה'חוקים' השולטים בה 45 68-69; על-ידי זרע 40
 70-83; רדי על 71
 'גנרציה' (מאמר ב-Grande Encyclopédie) 90
 דה'גוראף, ונייה 72 141; מצוטט 73
 גרהרד, צ'רלס פרדריק 119

204-203 201 173 168 151 148 147 145 144 141 138 136 135 131
 247 243-242 235 234 232 226 224 218 217 214-213 212 210 207
 ;320 290 284-283 280 273-272 266 261 250
 אבולוציונית/אינטגרציוניסטית 23-22; טומיסטית/רדוקציוניסטית
 ;23 מטרה 25; היסטוריה 33-26; הכללות 30-29; איבוד אשליות 32;
 מולקולרית 99 269 273-272 283 290 291 310 312 318 332; מדע חדש
 ;110 107; ותיאוריית התא 149; משתחררת מאילוצי הדטרמיניזם 199;
 נקודות מפנה 201 266-267; מדע ניסויי 201; שני ענפים 202-203;
 התרחבות 201-203; ופיסיקה וכימיה 215 267-269 273 333 348; מדע
 כמותי 224; שינויים בעמדתה 290; מושאיה 290-291; דיוקן־רובוט
 ;292-291; שני הזרמים (תולדות־הטבע ופיסילוגיה) מתאחדים 325;
 מצב המחקר 325-326 332-334; ומטפיסיקה 332; וחקר האדם 347-348

ביזור, התגוננות ופיזור 186

ביכנר, אדוארד 258-259 261; מצוטט 258

ביצים: של תרנגולות 144 149; באטלר על 239

ביציות 18 20 25 32 41 72-73 80 81-83 139 143 149 213-214; של הארווי
 70; אצל הנקבות 72-73 75 76; צורות 143; הפריה דיפרנציאלית

236-237

בישה, מארי־פרנסואה 133 134 138 205; מצוטט 109-111 133-134

בלביאני, אדוארד 234

בלון, פייר 37

בן־בנדן, אדוארד 235 237

בעל־חיים: התנהגות 20; כמודל של מכונה 59 276-277

בעל־חיים וצמחים, אנליזות של 61-62 120

בצילים (ראה גם חיידקים) 258 293

בקטריולוגיה (ובקטריולוגים) 285 287-291

בקה (של איברים) 202 209 211-213

בקה (וויסות) 303-311; מנגנוני 212-213

בראון, רוברט 137

ברגמן, טורבו אולף 112

ברוסה, פרנסואה 144

ברזליוס, ינס יעקוב 112 113 115-118 256 279; מצוטט 118

בריאה (Creation) 77 79 80 157 163; ואקראיות 202

ברידיג'ס, קלוין 247

בריואן, ליאון 274 276

ברירה 190-194; דארוין על 197

- הזדווגות 35 68 70 71 72 73 85 86; אצל צפרדעים 75 82
 הזרעה מלאכותית 83-84
- היווצרות-מוקדמת (Preformation) 69-84 85 87 89-90 93 96-98 101
 141-146 152 157 229
- היסטולוגיה (והיסטולוגים) 175 203
 היסטוריה של המדע – שתי דרכי הסתכלות 26-28
 היעלמות של צורות-ביניים 187
 היפוקראטס 36 230
- הירארכיה בת חמש רמות (במאה ה-18) 65
 'הישרדות המותאימים' (דארון) 193
 הכלאה (הצלבה ובני-כלאים) 17 35 68 85-86 89 102 155 215 225 226
 232 246-247 287 289 338
- הלמהולץ, הרמן 217; מצוטט 251-252
 הסתגלות (של אורגניזמים לסביבה) 318 322 350; ראה גם סביבה
 ואורגניזמים
- הפריה 19 74 75 77 81 83-82 139 141-142 145 229; איברים (ראה גם
 רביה) 104; עצמית 229
 הפרשות, סוגי 208
 הצלבה, ראה הוכלאה
- הקל, ארנסט היינריך 214 233; מצוטט 234
 הרטויג, האחיו 236; אוסקר 236; ריכרד 235
 הרטסוקר, ניקולאס 32 55 56; מצוטט 55 56 76
 השתנות (variability) 21; צורות שונות משתנות למינים 185; עלידי
 הטבע ולא המטפחים 192; בפרטים-יחידים ובאוכלוסיות 196; מקרית
 196
 התגבשות 305-306
- ואלאס, אלפרד ראסל 28 158 170 175 184 190 191 194 195; על ברירה
 טבעית 194
 וודווד, ג'ון 152
 ווהלר, פרידריך 113 115 119 252; מצוטט 113-114
 וולטייר, פרנסואה מרי ארואה 17 89
 וולף, קספר פרידריך 83-84 142
 ויטלי, כוח (ראה גם אנרגיה) 23 55 56 114 115 116 169 204 205 218 251
 252 273
 ויטליות, 'תופעות' 20

גרו, נחמיה 132

גרטנר, קרל פרידריך פון 225

גריעות 209-208 290-289 341; בעובר 236

גרעין (של תאים; של ביציות) 137 237-233 248 251 267 268 271 278

גתה 27 106 173; מצוטט 104 108-109 110 121 123 128

DNA – ראה חומצה דיאוקסיריבונוקליאית

דארון, ארסמוס 27 173

דארון, צ'רלס (ודארוניזם) 27-29 69 158 161 170 175 184 185 188-191

184 191-195 203-214 215 220 222 225 229 240 244; מצוטט 184

185-188 192-193 198

דבורים 345; ריקוד 345; מבנה חלת הדבש 53-55

דובנטון, לואי 103 128

דוז'ארדן; פליקס 137

דולבק, פול-אנרי תיירי 55

דומא, ז'אן-בטיסט 115 119 141

דטרמיניזם 199 206; ואקראיות 220; בטבע (ניוטון) 223

דיאסטאוזות (ראה גם אנזימים, תססים) 118 258 259 262

דידרו, דני 154 159 162 170 197; מצוטט 154

דיונון הרוקחים (cuttle fish) 130

דקארט, רנה 45 46 51 52 57 70; מצוטט 45-46 49 70-71

דרוזופילה (זבוב הפירות) 244 246-247 284

דריש, הנס 236

האלר, אלברכט 81 90 94 132 172; מצוטט 80 94-95

האקסלי, תומס הנרי: מצוטט 238

הארזי, ויליאם 31 51 58; מצוטט 51; ומכניזם 51; וגנרציה 51 69 70; omnia

70 ex ovo

הובס, תומס 49

הולדיין, ג'ון סקוט: מצוטט 268

הומבולדט, אלכסנדר 183

הומולוגיה (הומולוגי) 121 123 124; כרומוזומים 97; סדרות 119; איברים

121

הוק, רוברט 31 132

הורמונים 24 208 213 271 288 327-328 339 340 345

הורשה והעברה של תכונות נרכשות 18 19 240-241 246

- חוקרי־טבע (ראה גם תולדות־הטבע) 61 88 103 104 112 121 131 178 184
 187 203 204 232 255
- חיידקים (ראה גם בצילים) 285-292 334-335 340; קווי דמיון בינם לבין
 יונים וחולדות 285-286; זכריים ונקביים 287; תרבויות של 287-290
 291; בלתי־מוזיקים 292; רביה 316; מוצא 331; תאים חיידקיים, ראה
 תא־החיידק
- החי: ראשית 330 ואילך; 'חי נולד מחי...' 126
- חיים 50 60 88-112; מושג החיים 326; הכימיה של החיים 112-120 205
 255; רציפות של החי 146 148; הופעת החיים 151; ותמיסות
 קולואידיות 260; מוצא 330 ואילך; 'חיים נולדים מחיים' 146
- חילוף־חומרים (ראה גם: עיכול, מטבוליטים, מסלול מטבולי) 113-114
 217 262 285-287 293 295 297 305 309
- חלות דבש 53-55
- חלקיקים מבנה (ותיאוריה) של החומר 95 96 97
- חנקן, תרכובות 15-116
- חרקים 127-128 342 344-345; מטמורפוז 56 71
- הטבע: כוח ונדיבות 31; כוח יצירתי 36-37 41 מוסריות 44; פענוח 44-49;
 האדם והטבע 45; שלטון חוקי הטבע 46-47 68 89; 'טבע פלסטי' 55;
 קשרי־גומלין בטבע 62-63; וגופים אורגניים 105-106; 'תוצרים' 106;
 אורגני ואי־אורגני 106; 'תקציבו הקבוע' (גתה) 123; אחדות וגיוון 133;
 מפקח על התפתחות המינים 162; מתודולוגיה 168-170; 'כליו'
 169-170; תוכניתו 169 171; בובונותו 189; שתי דרכי הסתכלות 195;
 עורך ניסויים 203; 'מדלג' (ז) 62 245 246; ומוטציות 245
- טורנפור, ז'וזף פיטון 66 67 69 103; מצוטט 61 62 63 65 67
 טלאולוגיה 25
- טעויות (מזדמנות) בהתפתחות תאים חיידקיים 312-313; תיקון 317
- טקסונומיה (ראה סיווג)
- טרביראנוס, גוטפריד ריינהולד 107
- טרופופלסמה 238
- טרמבלי 84
- טרנספורמציות ותמורות 164-174 175-177 188-189
- טרנספורמיזם 27 29 154 155 156 160 163 172 174 195; של לאמארק
 172-173 174
- יוהאנסן, וילהלם לודויג 246

הלוגיקה של החי

- ויטליזם 20 56 112 114 138 258 268 325
 ויטמינים 265
 וייסמן, אוגוסט 238-241 244 246; מצוטט 239 242
 ויליס, תומס 56
 וינר, נורברט 213 276; מצוטט 276
 ויק ד'אזיר, פליקס 103 106 128
 וירכוב, רודולף 141 201 233; מצוטט 141 146
 וירוסים 257 285 287 290 292 304-306 316 320
 ולדאיאר, וילהלם 234
 וסאליוס, אנדריאס 51
 וריאציות, של אורגניזמים ואוכלוסיות 19

 זוויגיות 344-345
 ז'וסייה, אנטואן לורן 104 106 126; האחים 66
 ז'ופרואה סנט הילר, אטיין 27 121 122 123 124 127 128; מצוטט 121 123
 124 127 128 144
 ז'ופרואה סנט הילר, איזידור: מצוטט 145
 ז'ופרואה 57 76
 זיבולד, קרל תיאודור 140
 זיכרון 26 47 52 214; גנטי (תורשתי) 18 19 98 100 147 203 213-214 231
 267 273 277-278 303; מנטלי 18 19 98 342 343
 זיכרון ותורשה (ראה גם תורשה) 94-102
 זיקה (בין חומרים מסוימים) 57
 זמן 149-150 151-199; קשרים לזמן 151-152; וגופים חיים 321
 זרעים (seeds) 40-42 44 70-72 96-98 111; של זכר ונקבה 40 74-75
 חום 40-41; חשיבותו בגופים מאורגנים 115
 חומצה דיאוקסיריבונוקליאית (DNA) 30 289 298-303 321-322
 חומצה ריבונוקליאית (RNA) 300
 חומצת-גריין 19 25 33 250 268 281 298-303 306-313 314
 250 268 281 317-318 320 329 330 331-332 337 338 339
 חומרי מזון (ותזונה) חילוף חומרים של 39-241 (ראה גם חילוף חומרים)
 חומר (matter) 36 40-42 50 51 52 53 55-57 60 70 71-74 78 81 82
 89 94 98-101 110 111-112 113 114 115 120 132 134 136 172 195
 202 205 215 217 221 222 224 231 246 251 252 267 268
 269 274 275 277 285 296 304 306 320 330 333 350; נצחיות 111;
 המבנה החלקיקי של החומר (והתיאוריה) 95-98

- ליניאוס, קרל 29 57 61 66 69 103 154 155 190; מצוטט 61 62 64 65 67
 69-68; על המינים 68-69
 למידה (רכישת ידע) 342 343; ותורשה 343
- מאובנים (ושרידים) 21-22 153 159 163 167 182-174 182 183
 דה'מאיה, בנואה 27 152 154 156; מצוטט 155
 מאלפיגי, מרצלו 31 71 132
 מאלתוס, תומס רוברט 7 158 169 170 191; מצוטט 191
 המבנה הנראה 35-91; של צמחים ובעלי-חיים 60-62
 מבנים, סדר של 33; מבנה מסדר ראשון, מבנה מסדר שני (הארגון) 105 164
 201 231; מבנה מסדר שלישי (הגן) 203 231 267; מבנה מסדר רביעי
 (המסר) 273
 מגנטיות 115
 מוחל, הוגו 137
 מוות 110-111 260 335-336
 מוח 342 346
 מוטציות טבעיות (ומוטנטים) 245-249 286 287-288 290-291 313-315;
 'גורמים' במוטציות 19; חוקים 245; כללים 267
 מולדר, גריט יאן 116
 מולקולות (ראה גם מקרומולקולות) 18 23 271; של חומצות-ג'רעין 33
 'מונומר' (ברזליום) 279
 מונטיין, מישל אקוום 40; מצוטט 40 42 43
 מונטסקיה, שארל דה סקונדה 160
 מופרטואי, פייר מורו 85 87 88 90 91 95-101 132 135 141 147 154
 157 160-162 169 170 172 191 197 214 230; מצוטט 85 87 100
 160 161-162
 מורגן, צ'רלס 244 247
 מורפולוגיה 122 124 287
 מורפוגנזה 213 284
 מחשבים 25 289
 מטבוליטים 303-304 308 312 327 329; חיוניים 263 287 302
 'מטמורפוזזה': של חרקים 56; של מזון 113; בשמרי שיכר 117
 מטפיסיקה 52 332
 מטריאליזם 52 55
 מידע 17 19 25 274-276 283 299 307 314 319 322 334; גנטי 30 284
 315; זרימה של חומר, אנרגיה ומידע 115

הלוגיקה של החי

יצורונים (אנימלקולים) 101; בנוזל הספרמטי 32 83 141; במי שלוליות וכו'
72 73; בנוזל הזרע של הזכר 73; זכריים ונקביים 76; וחום 101; בגופים
אורגניים 135

כבידה 47 57 94
כוח (ראה גם אנרגיה) 101
'כוח' של היצורים המאורגנים 169-170
כוח ויטלי (ראה גם אנרגיה; ויטליזם) 23 55 56 114-116 169 204 205 218
251 252 273
כימיה (וכימאים; ראה גם ביוכימיה) 56-58 112-120 138 273; שפה 58 112;
אנליזה 112-114 116 250 263; סינתזה 113 251 252-253 260 263;
סיווג ומתן שמות 112; אורגנית 112-120 250-253 (ראה גם חיים);
אי-אורגנית 113 250-253; של תיפקודים פיסיולוגיים 201; אורגנית
ואי-אורגנית מתאחדות 250-255 258 264 266; ומיקרואורגניזמים 255;
כרומטוגרפיה 280-281
כרומוזומים 18 19 33 232 267 274 278 284 286 287 298-299 302 309
312 315-318 335 337-339; וגבישים 278; ריקוד 232-250; הומולוגיים
97; של האדם 349

לאמארק, ז'אן-בטיסט 27 29 106 107 164-177 195 196; מצוטט 103-107
164-167 169-173; כתבים ודעות 167-168 172-174; וביולוגיה 168
173; ותורשה 240
לאפלאט, פייר סימון 70
לב, ז'אק 236 260; מצוטט 260-261
לבואזיה, אנטואן לורן 57 58 102 112 117-118 204 210 212 259 262;
מצוטט 57 59-60; על נשימה ובעירה 59-60; על אידוי 117-118;
אנלוגיה בין בעלי-חיים למכונה 59
לבוהוק 31 32 132; על אנימלקולים ספרמטיים 73 76
לה-מטרי, ז'וליאן אופרואה 55
לורן, אוגוסט 119
לורנץ, קונרד 343
ליביג, יוסטוס 115 117 119 253 256; מצוטט 110 112-117
ליבניץ, גוטפריד וילהלם 46 98; מצוטט 45 79
לייל, צ'רלס 179 183 187; מצוטט 179-183
לימולוס (סרטן המלך) 21

- אקראיות: זמן 151; בהתפתחות המינים 139 140 350; 'חוק היקום'
 192 309; תיקון השפעותיה 323;
 משוב (בקרה), לולאות 275 276 278 309 323; הגדרה 276
 משיכה או דחיה הדדית בין פרטים יחידים 161
 'משפחות' (של מינים) 142-143 159-160 163 164 165
- נאודין, צ'רלס 225
 נבטים של גופים אורגניים יצורים מאורגנים 74-79 89-90; (תאי-זרע)
 מעטים מסוגלים להתפתח 189; 'נבט' גורם מחלה 257
 נגלי, קרל וילהלם 238; ומנדל 232
 נוזל הזרע
 נוזל ספרמטי 32 80-83 142
 נידהם, ג'ון 101
 ניוטון, אייזק (והניוטוניאנים) 28 47 48 56-57 89 91 94 101 132 220;
 ציטוט מספרו Optiks 89; מכניקת החומר של 94
 ניתוח סטטיסטי 215-224
 נפש 18 39-40 45 50 51 55
 נשימה 58-60 102 122 123 127 169 233; כצורה של בעירה 102 116-117;
 ואנזימים 262
- סביבה (ה-milieu של קונט) 22 147-148 155; השפעתה על התורשה 18
 152 170 246; ואוכלוסיות 22; והתרבות האורגניזמים 22; והתוכנה
 הגנטית 26; השפעתה על האורגניזמים 148 157-159 169-171
 317-318; השפעתם עליה 160; פעולות-גומלין בינה לביניהם 160
 176-177 197-198 209-210 339 341 342; קונפליט בינה לביניהם 189;
 ניצולה 185; הרחבתה (קונט) 210; והוראות גנטיות 317-318
 סביבה מיידית (surroundings) 176
 'סביבה פנימית' (ברנאר) 210-212
 סוג (genus) 65 67 69
 סוואמרדאם, יאן 56 71 75 77
 סומה, ראה תאים, תאי סומה
 סוסים 159; אלדרובאנדוס על 38; וזבובים (השוואה) 71
 סטור, גוטליב קונרד 103
 סטרטבנט, אלפרד הנרי 247
 סטנו, ניקולס 73
 סיבים 94-95 132 133

מילד, הרמן יוזף 246 247

מיניות (sexuality) 335-336 344

מינים (species) 60-69 89 90 93 157 158 165; טרנסמוטציה של 153-156;

רציפות 160; מוצא 161; הווה ועבר 183; דומים באזורים גיאולוגיים

שונים 184; משתנים הקובעים הופעת מינים חדשים 185; ייצור

מלאכותי של מינים חדשים 191-192

מיישר, פרידריך 250 268

מיקרואורגניזמים (ראה גם חיידקים; וירוסים) 255 257 262 263 284-291;

וניתוח גנטי 286;

מיקרו־ארגון (של היצורים החיים) 132

מיקרוביולוגיה (ומיקרוביולוגים) 285

מיקרובים 285-287 291

מיקרוסקופ 137 141 145 282; 31 32 33 56 62 71 72 73 76 77 83 84 101

132 137 141 145 203-204 234 244 257 260 282 285 293 306

מכונה ובעל־חיים (מודלים) 59-60 276-278

מכניקה 215

מכניקה סטטיסטית 215 220

מלבראנש, ניקולה 71 74; מצוטט 77 78

'מלחמת/מאבק־הקיום' 191 199; להישרדות 22 193 ולהתרבות 189

191-196 199

מכניזם 49-60

מנדל, האב יוהאן גרגור 18 31 195 201 215 225-226 246 250 289; חוקי

התורשה שלו 28 86-87; עבודתו ושיטותיו 226-232 242 243 246;

ונגלי 232 238; גילוי מחדש של חוקיו 242 243; ה'גורמים' שלו (הגנים

ע"ע) 230 246; מצוטט 226-232

מניזל, פייר 66

מסלול מטבולי 263-266 282 309

המסר 17 18 19 273 275-276 291-303; הגדרה 275-276 מערכת העצבים

342 343

מפלצות (ותופעות מפלצתיות; ראה גם אנומליות אנטומיות) 35 43-44

88-89 68 98 144-145 159 197 225 237 290 339; גורמים אמיתיים

להיווצרותן 144-145

מקסוול, ג'יימס קלרק 218-219 223 274 304 310 350; מצוטט 218

מקרו־ארגון (של היצורים החיים) 132

מקרו־מולקולות 18 273 275-284 294; ארגון 273; מבנה 278-284

מקריות (chance): בגילוי המדעי 32; אחד מחוקי היקום 215 224;

- פרו, קלוד 77; מצוטט 77
 פרוטוזואה 235 239 292
 פרוטופלסמה 137 146 233-234 251 260-261 271
 פרוטיסטה 140 146 235
 פרידריך זילהלם 161
 פראן, ז'אן־בטיסט 32
 דה־פריס, הוגו 243 244; מצוטט 242-245
 פרנל, ז'אן 31 36 51; מצוטט 40-42
 פרנקלין, בנג'מין 169
 פאראצלסוס, תיאופרסט 37-38; מצוטט 37-38 42
 פרתנוגוזה (רביית בתולים) 82 139 146; מלאכותית 236
 פתולוגיה (פתולוגי; ותנאים פתולוגיים) 144 207-208 256 257 290

 צאצאות (filiation) 24 36 39 69 76 80 86 93 98 168
 ציטולוגיה (וציטולוגים) 234 237 241 247 286
 ציטופלסמה 237 248 300 302 306 308
 צסאלפינוס, אנוריאה: מצוטט 39
 צפלופודים 130
 צפרדעים: הזדווגות 75 82; רביה 82 83
 צ'רמק, אריך 243

 קאבאניס, פייר 111 170
 קאנון, וולטר 213
 קאנט, עמנואל 108-110
 קארדנו, הירוסום 36; מצוטט 39 40-41
 קאראמאזוב, איוואן 202
 קארנו, סדי 115 215
 קבוצות תאחיזה 247
 קוביה, ז'ורז' 29 69 110 121 124-130 143 177-179 203 204 211; מצוטט
 110 111 120-122 124-126 128-131 176 178
 קולבה, הרמן 252
 קולואידים (וקולואידי) 260-261 267 271
 קונדיאק, אטיין 48
 קונט, אוגוסט 147 176 210; מצוטט 147 177
 'קופסה שחורה', שיטה (בניתוח גנטי) 249 273
 קורן, קרל 243

הלוגיקה של החי

סיווג (classification) ומיון (taxonomy) של צמחים ובעלי-חיים 63-69 88
103-104 108 112 163; 'כל סיווג אמיתי הוא גיניאלוגי' (דארווין) 187

סילארד, ליאו 274

סכולסטיציזם 44 65 67

ספאלאנצאני, לצרו 27 29 59 82-83 86 90 258; מצוטט 82 83

ספנסר, הרברט 347

סרטן, מקור 341

'סרקוד' (ראה פרטופלסמה) 137

עוברים (embryos): התפתחות 99 141-145 149-150; קווי דמיון ושוני
142-143 149-150 160; (fetuses): 98 111; השפעת נזקים עליהם

144-145

עובש 286

עולם-החי, ייצוג: שרשרת יצורים 152-153 156-157 164 167-168 173
175 196; אילן גיניאלוגי (דארווין) 186-188 193

עיכול (ראה גם חילוף חומרים) 58-60 208 262

עריכת ניסויים 203-215

פאלאס, פטר סימון 106

פארה, אמברואז 35 37 43; מצוטט 35 41; על מפלצות 43

פולמורים (ופילמור) 266 279-282 289 294 296 298-299 329 331 332;
ייצור 255-256; שרשרת 273

פונטול, ברנאר 54 79 80-81 109; מצוטט 54 64

פורטה, ג'ובאני בטיסטה: מצוטט 37

פורקינייה, יאן 137

פחמן (בכימיה אורגנית) 253-254

פינל, פיליפ 133

פיסיולוגיה (ופיסיולוגים) 49 50 52 58 60 88 112 122 124 144 202-209
212 213 215 273 325 348; ורפואה 207-208; ניסויית 215 290

פיסיקה 56 59 215-217 273 325; מגבלות 268-269

פלמינג, וולטר 234

פנגוזה 230-232 241

פסטר, לואי 27 29 32 201 256-258 263 285; מצוטט 255 257; על תסיסה
257-258

פסקל, בלז 31

פענוח הטבע 44-48

פרבוס, 141

- שברל, מישל-אז'ן 118
 שואות 187 179-177 173 164-152 21
 שוואן, תיאודור 140-137; מצוטט 140-138
 'שותפות המוצא' 187
 שטובריאן, פרנסואה-ירנה 145
 שטאהל, גיאורג ארנסט 55-54
 שיווי-משקל בעולם-החי 32 155 158 173 197 336
 שילה, קרל וילהלם 112
 שילוב (integration) של גופים חיים (ראה גם האינטגרון) 271-272 275
 318; שלושה שלבים 329; ותקשורת 346-347; משנה איכות 350
 שליידן, מתיאס יעקוב 137 140; מצוטט 139
 שמר (ראה גם קטליזה, אנזימים, תסיסה) 117 258 261 262 263 264 285
 286 292 337
 שמש (כמקור אנרגיה עיקרי) 264
 שפת סימנים שבעלי-חיים מבינים 346
 שרדינגר, ארוין 276 278 284; מצוטט 269 275 278
 שש-אצבעיות, תכונה נורשת 87-88
- תאים (alveoli): 24 26 30-33 131-150 233-234 260 261 289 303-304
 333; חיידיקים, ראה תא-החידק; בחלת דבש 53-55; גילוי 131-132;
 גיוון 133-134; רקמות 133-134; שילוב 135-136; חיים כפולים 139;
 יצירה 140; צורות 145; נעשים אורגניזמים 145-146; פעולתם 205-206;
 'מוקד המחקר' 232-233; הרכבם 233-234; תאי הנבט 238-240 תאי
 הגוף (סומה) 238-239; 'שק של מולקולות' 271; הכימיה
 והארכיטקטורה שלהם 303-311; מתמחים ומתקשרים 339-342; חקר
 291-303 303-323; תיאוריה, ראה תיאוריית התא
 תא-החידק: חקר 291-303 303-323; מגבלות הידע העכשווי 319-323;
 היסטוריה 321
 'תבניות פנימיות' (של בופון) 99-100 159
 תורשה (ראה גב גנטיקה, הורשה) 17-20 24 26 31 42 84-88 160 186 198
 201 203 213-215 226-225 233 240 242-244 246-247 248-249 250
 267 269 278 284-288 300 301 302 325 342 346 348; והשפעות
 הסביבה 18 170-171; המסר 19; היסטוריה 26; דואלית 90; זיכרון
 94-102 203 231 273 303; 'יוצרת [אך] אין היא מסתגלת' 170-171;
 משמרת וריאציות 192 194; קלוד ברנאר על 213; מורכבות 225; מנדל
 ומדע התורשה 28 225-232; והמשכיות התא 233; חומר 238-239;

הלוגיקה של החי

- קטליזה (וזרזים, ראה גם תסיסה) 118 256 259 260 263 265 271 301 304
 267 265 309 319 327; אנזימטית 267 265
 קיברנטיקה 213 271 275
 קיום, שלושה סוגי 211-212
 קיום-מוקדם של נבטים, רעיון 76-79
 קיפורד'הים 236
 קלאוזוס, דודולף 218
 קלרויטר, יוזף: מצוטט 87
 קמפר, פטרוס 103
 קקולה, אוגוסט 253
 קרומים פשוטים ומורכבים 134
 קריסטלוגרפיה (וקריסטלוגרפים) (ראה גם גבישים, התגבשות) 53 258 283
 288-289 297 333
 קרני X, 246 282-283

ראומי, ונה 53 59 80 82 85-87 89; מצוטט 53-54 59 82 85 86; והצלבות
 86

ראשיתם של חיים אורגניים 331 ואילך

רביה/התרבות (reproduction) 17-34 36 42-43 89-91 96-97 102 104
 136-137 146 152 160 198-199 213-215 233 235 237-239 332-333;
 היסטוריה 26-27; שיטות (רבות) 146; מושג 163; מהירות 190; מאבק
 למען 193-194 197; מינית 287-288 335-336 344-345; של מולקולות
 (שחזור) 310-311; במשך שני מיליארדי שנים 311-312; וסיכוי 321
 350; יחידות רביה 344-345; 'רביה', ערך ב-Grande Encyclopédie, 89
 90; מצוטט 90

רגנרציה (של גוף שלם מחלקים) 26 84 89-90

רדי, פרנצ'סקו 27 29 71; מצוטט 71

רדיואיזוטופים 282

רובינה, ז'אן-בטיסט 154 156; מצוטט 63 156

רופאים 49 88 112; פאראצלזוס על 37-38

ריי, ג'ון 66; מצוטט 68

רמאק, רוברט: מצוטט 145-146

'רצון חופשי' 344

רקמות 133-135 138-148; חיות, הרכב של 116 261-262

רקומבינציה 19 247 248 267 286 288 316-317 335

הלוגיקה של החי

- והפרט־היחיד 239-242; גטיה תורשתית 241; ומתמטיקה 242;
 ותיאוריית הקוואנטים 247; ואבולוציה 248; וזכרון המחשב 278; בקרב
 המיקרו־אורגניזמים 286-287; המכניקה של 261; ומחשבים 289;
 ומערכת העצבים, למידה וזיכרון 343; תוכנה 346; ובלשנות 348
 תולדות־הטבע (Natural History; ראה גם חוקר־טבע) 29 49 61 66-68 69
 88 202 204 325; מטר 66-67
 התוכנה (the programme) 17-33; ראה גם: חלבונים של התוכנה הגנטית
 116 266-268 281-282 286 289 290 297-298 299-300 301 303-311
 312 314-315 319-320 327-328 329 331-332; והגנים 267; סינתזה
 299-300; בקרים 307-309 314; 'רגישות' 310
 תוכנה/ות גנטית/יות (ראה גם התוכנה) 19 25 26 293 305 307 312 314
 315-316 320 322-323 328 330-331 334-338 340-341 342-344 345
 348 349; מוצא 331; הרחבה 338-339; של האדם 348
 'תופעות ויטליות' (ראה גם ויטליזם) 20
 תופעות, יצירה של 207-210
 תיאוריית התא 135 137-150 175 201 205 213 285
 תיאוריות מדעיות – אבולוציה של 27; הופעה בטרם זמן 28; חשיבותן 28;
 ראה גם: אבולוציה; האטום 112; אינפורמציה 224 266; אנימיזם;
 ביולוגיות 30; בריאה ספונטנית 29; גנרציה; הגן 249; החלקיקים של
 החומר 95; היווצרות-מוקדמת; הסתברות 219; טרנספורמיזם 155 160;
 מכניקה 215; פיסיקליות 31; פנגוזה 230; קיום-מוקדם; התא, ראה
 תיאוריית התא; תורשה 30; זיקנה, תיאוריה עכשווית 336-337
 תיפקודים בעולם־החי: אחדות 265; ומבנים 272
 תכונות אופייניות: בצמחים 64-65 67; בגופים אורגניים (באופן כללי)
 103-104 126; ביזור 186; 'צמודות' 246-247 311; חקר 249
 תסיסה (ראה גם קטליזה) 117 201 256-260 263 264; 'גורמי' תסיסה 256
 258; תססים 'מאורגנים' ר'בלתי-מאורגנים' 258
 התקופה הקלאסית (מאות 18 ו-19) 39 44 45 47 49 52 55 56 60 67-69
 72 76 89 108 109 111-112
 תקשורת בין אורגניזמים 344 346-347
 תרכובות הנקניות 115-116
 תרמודינמיקה (ותרמודינמי) 205 215 217-218 252 326 327; החוק השני
 217 219 221 275 277; סטטיסטית 221-224 274; יציבות 284; מגבלות
 307; ותיאום התא 308

הלוגיקה

של
החי



היסטוריה
של התורשה

פרנסואה ז'אקוב

מה ידע האדם על מקור החיים? כיצד השתנו הבנתו ורעיונותיו באשר למושגי התורשה, התרבות החי והתפתחותו? מדעי החיים שינו שינוי קיצוני את האופן שבו האדם מתבונן בטבעו שלו, במוצאו וביחסיו עם עולם החי.

הלוגיקה של החי - ספרו הקלאסי של אחד האישים הגדולים בענף הביולוגיה של ימינו - בוחן את השינויים שחלו באופן התבוננותו של האדם בטבע ובמבניהם של היצורים החיים ואת התפתחות חקר עולם החי למן המהפכה המדעית במאה ה-17 ועד ימינו.

ז'אקוב מתאר כיצד השתנתה תפיסת התורשה וההתפתחות - למן הגישה של "היווצרות", שלפיה כל בריאה חדשה של בן אדם או בעל חיים מחייבת התערבות של כוח חיצוני, אלוהי, ועד לגישה ה"קתרובת", הנתפסת כתכונת יסוד של כל היצורים החיים בטבע ואינה מצריכה התערבות אלוהית. חקר מבנה האורגניזם מוצג בספר כפתיחת בובת עץ רוסית - למן הצורה הנראית של בעל החיים. דרך ארגון המבנה הפנימי שלו, ועד לִקְן ומבנהו המולקולרי.

הלוגיקה של החי מאיר את מושגי היסוד בהתפתחות הביולוגיה והמדעים, בתוך כך מתייחס לרעיונות במישור התרבותי והמדעי של זמנם ומשווה אותם. זהו ספר יסוד בהבנת עולם הטבע ואופן חשיפתו והבנתו על ידי האדם. **הלוגיקה של החי** - ספר מרתק ובהיר שיעניין כל אדם משכיל.

פרנסואה ז'אקוב

מומחה לחקר המנגנונים הגנטיים, חתן פרס נובל לרפואה ופיסולוגיה (1965); עם ז'אק מונו ואנדרה לבוב. היה ראש מכון פסטר בפריס וראש המחלקה לגנטיקה של התא באוניברסיטת סורבון. חיבר ספרים בביולוגיה ובהגותה, בהם בין ה**רצוי למצוי**, שראה אור גם בעברית (הוצאת כתר, 1989).

ישעיהו ליבוביץ

כתב מסה מיוחדת למהדורה זו - "בין התפתחות לאבולוציה" - ובה הוא מעיין בקשר שבין תורשה, התפתחות ואבולוציה.

