פרוזה

פילוסופיה ומדע

על זבובים, עכברים ואנשים

פרנסואה ז'קוב

יובל לגילוי מבנה ה-DNA

ספרי עליית הגג • ידיעות אחרונות • ספרי חמד

על זבובים, עכברים ואנשים

חתן פרס נובל לרפואה, הצרפתי פרנסואה ז'קוב, הוא ממחולליה של המהפכה הביולוגית העצומה של הדור הקודם. אבל ז'קוב הוא גם מה שלא תמיד נכון לומר על מדענים: הוא איש תרבות אמיתי, סופר מרתק, ומה לעשות – אדם חכם. בהומור, באלגנטיות, ולעיתים בפרוזה שיש בה פיוט, מוליך ז'קוב את הקורא במסלול שיש בו לא רק חידות, אלא גם כיוונים ברורים של פתרונות, ובהם תבניות של יופי. העכבר, הזבוב, ואנחנו האנשים – האם כולנו צירופֵי צירופים של אבני יסוד אחידות? מעט אנשי מדע זכו לתשבחות כה רבות כפי שזכה להן ז'קוב על כתיבתו הבהירה ועל רגישותו המוסרית בנושאים שהם ברומו של עולם המדע של ימינו.

על זבובים, עכברים ואנשים יוצא לאור במקביל לספר המסמל את פתיחת העידן החדש בביולוגיה – **הסליל הכפול** – ובמהדורה עברית זו הוא מלוּוֶה במבוא מאיר עיניים של ד"ר אורן הַרמן על קורותיה של המהפכה בת החמישים, ועל מקומו המיוחד של ז'קוב בהרפתקה הנהדרת.

פרנסואה ז'קוב

על זבובים, עכברים ואנשים

מצרפתית: אבנר בהט

ספרי עליית הגג • ידיעות אחרונות • ספרי חמד

FRANÇOIS JACOB
LA SOURIS, LA MOUCHE ET L'HOMME

פרנסואה ז׳קוב
על זבובים, עכברים ואנשים

Published with the help of the French Ministry of Culture - CNL

© EDITIONS ODILE JACOB, 1997
© 2004 כל הזכויות בעברית שמורות
למשכל בע״מ – הוצאה לאור מיסודן של ידיעות אחרונות וספרי חמד
ת״ד 53494 תל אביב 61534
E-mail: info@ybook.co.il
ולספרי עליית הגג בע״מ, תל אביב, ת״ד 23146
E-mail: info@booksintheattic.co.il

המערכת מודה לפרופ׳ אורי כץ על עזרתו.

עריכה מדעית: עדי מרקוזה־הס
עימוד ולוחות: גאלה קדם דפוס בע״מ

אין לשכפל להעתיק, לצלם, להקליט, להחסין במאגר מידע,
לשדר או לקלוט בכל דרך או בכל אמצעי אלקטרוני, אופטי,
מכני או אחר כל חלק שהוא מן החומר שבספר זה.
שימוש מסחרי מכל סוג שהוא בחומר הכלול בספר זה אסור
בהחלט אלא ברשות מפורשת בכתב מהמו״ל.

דאנאקוד: 362-1910
ISBN 965-448-733-0 מסת״ב

Printed in Israel 2004 נדפס בישראל

תוכן העניינים

הקדמה למהדורה העברית

מבוא למהדורה העברית: ד״ר אורן הרמן

מבוא

פרק ראשון: חשיבות הבלתי ניתן לחיזוי

פרק שני : הזבוב

פרק שלישי: העכבר

פרק רביעי: משחק ההרכבה [הַמֶּכָּנוֹ]

פרק חמישי: הזהה והשונה

פרק שישי: הטוב והרע

פרק שביעי: היפה והאמיתי

חתימה

הקדמה למהדורה העברית

לעונג הוא לי לדעת כי ספרי **על זבובים, עכברים ואנשים** מתורגם לעברית ואכן יוצא עכשיו לאור. ברצוני להודות לכל העוסקים במלאכה, האחראים למהדורה העברית הזאת.

הספר הזה נולד לאחר שאופיו של המחקר שלי עבר שינוי גמור. במשך שנים רבות הייתי עסוק בעבודה על הגנטיקה של חיידקים, והנה, בשנות השישים חשבתי כי כדאי שאחליף את האורגניזם שהוא נושא המחקר שלי ואתחיל לעבוד על בעל חיים שיש לו נפש, שמביט בי, בעל-חיים שיש לו חיי מין של ממש. כמו ביולוגים מולקולריים רבים, עברתי לחקור אורגניזם רב-תאי, אשר במקרה שלי היה העכבר. נראה היה לי מאוד מתקבל על הדעת – זה היה בתחילת שנות השבעים – שהחיה הקטנה הזאת, שהיינו מסוגלים ללמוד את התכונות הגנטיות שלה, בוודאי תהיה מועילה בחקר בני האדם, ובמיוחד, כך חשבתי, הואיל ואפשר היה באמת לעבוד על דגמֵי ניסויים הנוגעים למחלות אנושיות רבות, התחלתי לשחק עם עוברים של עכברים, גידולים סרטניים ממקור עוברי, תאי גזע, הפריות מבחנה והחדרת העוברים לרחם, וכיוצא באלה ניסויים. במהרה הגעתי אל ההכרה כי מה שאנחנו מוצאים אצל עכברים, לא יעבור זמן רב ונוכל להחיל גם על בני-אדם. במילים אחרות, הבנתי שאם במשך מאות בשנים אנשים ניסו להתענג בלי להוליד ילדים, הנה בקרוב יהיו להם ילדים בלי העונג.

בתחילתה של המאה העשרים ואחת, הביולוגיה נכנסת עכשיו אל שלב חדש. מאז שנולדה כמדע, בתחילת המאה ה-19, היא היתה במהותה מדע אנאליטי. השיטה הרדוקציוניסטית הביאה לידי גילוי של סידרת מבנים בבעלי החיים, מבנים שנמצאו חבויים יותר ויותר במעמקי האורגניזם. בסוף המאה שעברה נמצא המבנה החבוי ביותר – הגנום; הביולוגים הצליחו לגלות לנו את המבנה המולקולרי שלו.

עכשיו עומדת הביולוגיה להפנות את השאפתנות המחקרית שלה כביכול במהופך, ולנסות לשחזר מבנים מסוימים מן היסודות שלהם: תצמידים מולקולריים עם פרוטֶאומים, אברים עם תאי גזע, וכן הלאה. וכך שוב אנחנו ניצבים מול הלא-ידוע, ושוב, עמדת זינוק כל-כך מרגשת!

פרנסואה ז׳קוב

פריז, חורף 2004

מבוא למהדורה העברית

פרנסואה ז׳קוב ולידתה של הביולוגיה המולקולרית

באחת מן הגירסאות הרבות של הסרט A Christmas Carol (זמירות לחג המולד), לפי ספרו של צ׳רלס דיקנס בשם זה, הגיבור אבנעזר סְקְרוּג׳ נתקל בג׳נטלמן מכובד בשעה שהשניים עמדו בפתח ביתו של שותפו הגוסס של סקרוג׳, ג׳ייקוב מאולי. ״אתה הרופא?״ שואל סקרוג׳. ״לא״, עונה האיש, ״אני הקברן; הביזנס שלנו הוא ביזנס תחרותי.״ בעולם היריבויות העזות, שנקרא המחקר הביו-רפואי, מבשרים וקברנים של מבשרים וקברנים של קברנים עטים במירוץ מטורף אחר התגלית הגדולה של המחר. אפשר להבין אותם. הפרס למנצח, בעולם שהולך ומושפע מן הדחף

העז להשתלט על המוות ועל החולי, איננו פחות מתהילת עולם. ובנוסף לכך, כמובן, ובמידה גוברת – הרבה, הרבה כסף. אך גם אם לא כולם ניחנו בכישוריו (ובענוותו) של אייזק ניוטון הגדול, הרי שבדיוק כמוהו, מן החוקר המהולל ביותר ועד טכנאי המעבדה הפשוט, הביולוגים יודעים היטב שאת עבודתם היום לא יכולים היו לעשות אילו לא עמדו על כתפיהם של ענקים. המחקר הביו-רפואי כולו מתבסס היום על הביולוגיה המולקולרית, מרחב מדעי שרק לפני כחמישים שנה לא היה לו שם. או אז, בין השנים 1930-1960, קבוצה מצומצמת של חלוצים מבריקים הגדירו, ולאמיתו של דבר יצרו, את התחום, תוך שהם משנים באופן רדיקלי את העולם מסביבם. לכשייכתבו ספרי ההיסטוריה בדורות הבאים, המהפכה המולקולרית תֵּרשם כַּמפעל שהגדיר יותר מכול את זמננו. מה שברור היום הוא שבין אותם ענקים חלוציים מובטח מקומו של ענק מיוחד במינו: פרנסואה ז׳קוב.

לפני שניגש לספר על ז׳קוב, עלינו לבנות את התפאורה לקונצרט אינטלקטואלי מרהיב: נושא בעל עומק ועניין רב; סינתזה גרנדיוזית של מספר אפיקי מחשבה עצמאיים; תמורה עמוקה ביותר של האופנים שבהם מדענים הגדירו את רעיונותיהם בנושא – אין כל ספק שעלייתה של הביולוגיה המולקולרית עומדת בשלושת התנאים הללו, והיא אכן אחת המהפכות הגדולות בהיסטוריה של המדעים. אבל איזה סוג של מהפכה היא? במהפכות המעניינות בפיזיקה, מן האסטרונומיה הקופרניקאית, דרך הפיזיקה של ניוטון, תורת היחסות של אינשטיין, ועד למכניקת הקוונטים, המאבקים ניטשו על שדה-קרב בודד ודרמטי: צרור של רעיונות, קשורים זה בזה קשר הדוק ומובנים באופן מלא, הובסו במערכה על-ידי צרור אחר של רעיונות, קשורים אף הם קשר הדוק ומובנים באופן מלא. לא כך בביולוגיה. צלילים בודדים הגולשים מן השורה, סִינְקוֹפּוֹת, מירווחים של דממה, הפוגות, גישושים מחודשים של משפטים מוזיקליים, הססניים, צורמניים, מבוישים... בסיפור שלפנינו שום צרור אָגוד ומבואר היטב לא החליף צרור אחר. כאן קבוצה של תועים מאוד מוכשרים, הפוסעים עקב בצד אגודל, בתושיה ובהרבה מזל, פענחו את הסודות הבסיסיים ביותר של החיים. בסופו של התהליך הכינו לנו סימפוניה מופלאה מכפי שיכלו אף הם לדמיין.

* * *

הסיפור אולי מתחיל, אם כי לא באופן כרונולוגי, בסתיו 1951, אז הגיע בחור בן 23, דוקטור לגנטיקה בעל עיניים כחולות נוקבות במיוחד ומבט מסוקרן ומעט מוזר – ג׳יימס ווטסון (Watson) שמו – מערבות אינדיאנה שבארצות-הברית לעיירה אנגלית קצת רדומה הנושאת את שמו של נהר הקאם, המתפתל בין בנייני האוניברסיטה העתיקה שלה. שם, בקיימברידג׳, פגש ווטסון דוקטורנט מתוסכל בן 35, פיזיקאי בדימוס, שמעבדתו נופצה על-ידי פגז גרמני בזמן המלחמה, אשר פנה למחוזות הביולוגיה – פרנסיס קריק (Crick) שמו. הייתי ממשיך לספר את הסיפור של תגלית מבנה הדנ״א – DNA – המולקולה המפורסמת הנושאת את גורל התורשה מדור לדור, אלמלא עשה זאת כבר, ובכשרון גדול, מישהו מוסמך בהרבה. הקורא המתעניין מוזמן לעיין בגירסתו הציורית של ווטסון עצמו – **הסליל הכפול** – היוצאת לאור בימים אלה במקביל לספר הזה, ובאותה סידרה: פרוזה: פילוסופיה ומדע. החשוב לענייננו הוא שבבואו לאנגליה הפגיש ווטסון בין שתי מסורות ביולוגיות, האחת אמריקנית ברובה, והשנייה אנגלית בעיקרה, מסורות שהזיווג ביניהן הוא שאיפשר לצמד הלא-לגמרי-סביר הזה – בעזרת קבוצה של שחקני משנה חשובים – לפצח את מולקולת הדנ״א החמקנית. האסכולה האמריקנית התחקתה אחר הגֵן התיפקודי, החד-ממדי, באמצעים ביוכימיים וגנטיים, והשאלות שעניינו אותה היו: מהו ההרכב הכימי של החומר התורשתי? כיצד פועל מנגנון העברת התכונות בתורשה מדור לדור? המסורת השנייה –

האנגלית – התבססה על טכנולוגיה בשם קריסטלוגרפיה, שפותחה בסביבות 1915 על-ידי סר לורנס בְּראג (Bragg), לימים הבוס של ווטסון וקריק בקיימברידג׳ ובעקבות התגלית – חתן פרס נובל הצעיר בהיסטוריה, בגיל 25. השאלה שעניינה את האנגלים היתה כיצד באמצעות הקרנה של קרן X (רנטגן) על גבישי מולקולות ביולוגיות חשובות כמו חלבונים ודנ״א, ניתן להסיק את המבנה האטומי התלת-ממדי שלהם. החיבור בין השאלה התיפקודית לזו המבנית הוא שהוביל להצלחה, משום שהסתבר שבעולם האורגני קיים קשר הדוק בין השניים. לימים הפכה תובנה זו לבשורה החשובה ביותר של הביולוגיה המולקולרית.

כשווטסון וקריק הצליחו לקראת סוף פברואר 1953 לפצח את מבנה הדנ״א – שבוע שהסתיים בהכרזתו הנרגשת של קריק לכל מי שנקלע לפאב ה-Eagle על כוסות בירה כי ״ווטסון ואני גילינו את סוד החיים!״ – היה ברור כי אותה מולקולה, המורכבת בסך-הכול מארבעה בסיסים חנקניים וקצת סוכר ופוספט ונחשבה כמעט על-ידי כולם זמן קצר קודם לכן ל״מולקולה מטומטמת״ – היא זו שמגולם בה הפוטנציאל לאגירת המידע התורשתי כולו. איזה פלא! בגרעין שגודלו קטן מ-1/10,000 של מילימטר מקופל טקסט ארוך פי 800 מן התנ״ך, טקסט שניתן להעתיקו במלואו, כמעט ללא טעויות, ולהעבירו מדור לדור – וכל זאת באמצעות אחת המולקולות היותר פשוטות בגוף. ווטסון וקריק רמזו על כך כשכתבו את אחת הסיומות הקלאסיות – והפחות צנועות – בהיסטוריה של הספרות המדעית: ״לא נעלם מעינינו (It has not escaped our notice...) כי אופן זיווג הבסיסים הספציפי שקבענו מצביע באופן מיידי על מנגנון אפשרי להכפלת החומר התורשתי.״

אבל מה היה הקוד הגנטי? הדנ״א הוא רצף הבנוי מארבעה בסיסים חנקניים בלבד, המצוינים בקצרה על-ידי האותיות A,T,C,G. בחיידק מסוים, הרצף (לדוגמא ACGGCGGATT ...) מגיע לשלושה וחצי מיליון אותיות; בזבוב, למאה שישים וחמישה מיליון אותיות; ובאדם – למעלה משלושה מיליארד אותיות. הקשר שאפשר לזהות בין אורך הרצף ובין מורכבות היצור איננו קיים במציאות: לתירס יש רצף בן ארבעה וחצי מיליארד אותיות; לשושן המצוי רצף פי עשרים וחמישה ארוך אף מזה! לעומת זאת, חלבון ממוצע – וקיימים כמה מאות אלפי חלבונים – מורכב מרצף של 500 חומצות אמיניות. בטבע ישנם עשרים סוגים שונים של חומצות אמיניות בעלי חשיבות ביולוגית. כיצד, אם כן, מתרגם התא את הקוד בן ארבע האותיות בדנ״א לכדי יצירה של אותם חלבונים ואֶנְזִימִים שהרכבם וטבעם האופייני מגדיר את ייחודו של כל יצור חי? איך ״פוקד״ הקוד על התא לבחור את הרצף המדויק של החלבון הספציפי שאותו הוא רוצה לסַנְתֵּז? למרות ההצלחה הגדולה של ווטסון וקריק, אף אחד מאלה שנאספו אל דלת הכנסייה לא הצליח עדיין לחדור אל קודש הקודשים. השאלות החשובות באמת נותרו אז בגדר מסתורין.

* * *

והנה, אל הבעיה המרכזית – כיצד ההוראות הגנטיות המקופלות בדנ״א מתורגמות לכדי סינתזה של חלבונים – ניגשו כעת החוקרים בשלושה מסלולים מקבילים ומִתחרים: המסלול הביוכימי, המסלול הגנטי, ומסלול חדש שקריק קרא לו ״בעיית הקידוד״. המירוץ התנהל בארבעה מוקדים עיקריים, שונים בתכלית האחד מרעהו בכל היבט אפשרי, למעט זה החשוב מכול: התאווה המשותפת – ממש תשוקה – לפצח את ״הסוד השני של החיים״.

נציג בקצרה את הנפשות הפועלות:

מתישהו בסוף שנות הארבעים, ישב הפיזיקאי סימור (Benzer) באוניברסיטת פֶּרדוּ שבאינדיאנה, וקרא ספר קטן של פיזיקאי אחר – ?What Is Life – מאת חתן פרס נובל לפיזיקה אֶרוין שרדינגר (Schredinger). כמו פיזיקאים רבים אחרים, וביניהם קריק ומורו ורבו של ווטסון, מקס דלברוק (Delbruck), החליט מייד לעזוב את הפיזיקה לטובת הביולוגיה. שהרי שרדינגר הציב בפניהם אתגר שקשה לעמוד בפניו: להשתמש בכלים של הפיזיקה כדי לפצח את סוד החיים. זאת ועוד: שרדינגר אף טען כי ייתכן שבביולוגיה יתגלו חוקים חדשים שהפיזיקה אינה מכירה. חוקי הפיזיקה הרי הם סטטיסטיים והסתברותיים. ככל שהמערכת הנבדקת גדולה יותר, יכולת הניבוי במה שנוגע להתנהגותה גדלה: סדר נולד מאי-סדר. אך הנה, במערכת קטנטנה כמו הגֵן, מערכת שכל גודלה 150-100 מירווחים אטומיים, אנחנו צופים בהתנהגות שהיא לחלוטין ניתנת לחיזוי. הגן מכפיל את עצמו כמעט ללא טעות, דור אחרי דור אחרי דור! כיצד אפשרי הדבר? לפיזיקה לא היתה תשובה, אבל שרדינגר הציב אתגר לעוסקים בה – להשתמש בכֵּלֶיהָ כדי למצוא פתרון. הפיתוי היה עצום. משמעות הדבר היתה שניתן לחשוב על הגן לא כעל רעיון מופשט בלבד – מה שהפילוסופים של המדע מכנים "ישות תיאורטית" – תוצר לוואי מתמטי של המערך הניסויי של גנטיקאים. לא! אם ניתן להשתמש בפיזיקה כדי להבין את החיים, הרי שהגן הוא חומר ממשי, פיזי, משהו שניתן לא רק לגעת בו, אלא גם לפרוס אותו לחתיכות, ממש כמו עוגה. ברית נישואין היסטורית נכרתה בין שני תחומי המדע העתיקים, ברית שאותה המכניסטים של המאה השבע-עשרה, ובראשם דקארט, כבר ניסו – באמצעים דלים יותר – לערוך שנים רבות קודם-לכן. כעת, לאחר מהפכת הפיזיקה הקוונטית, נראה היה כי השעה בשלה כדי לחדש שוב את היחסים. בתוך כך זנח בֶּנְזֶר את חקר הפיזיקה של חומרים מוצקים – ללא חיים – והמציא את השיטה הישירה ביותר לבחון את הקשר בין הגן ובין החלבון שהוא מייצר: ערוך מיפוי של הגן, עֲשֵׂה הַרְצָפָה (sequencing) של החלבונים המקבילים של המוטַנְט כדי לראות היכן חלו שינויים בחומצות האמיניות של החלבון, והשוֵה. ביסוד עבודתו עמדה ההנחה הקריטית של המפעל כולו: קיים קשר ישיר בין הרצף של חומצות הבסיס של הדנ"א ובין החומצות האמיניות המרכיבות את החלבון שהוא מקודד.

כמה אלפי קילומטרים מזרחה ממעבדתו של בנזר קבוצה של ביוכימאים בבית-חולים בבוסטון בראשותו של פול זָמֶצ'ניק (Zamecnik) שאלו שאלות אחרות. החוקרים ידעו שכאשר התא גדל ומייצר חלבונים, ניתן למצוא בתוכו כמויות גדולות של חומר הדומה מאוד לדנ"א אך שונה ממנו בהרכב אחד מארבעה הבסיסים החנקניים (במקום T יש לו U), ובהיותו סליל יחיד ולא כפול. לחומר הזה קראו רנ"א – RNA. בעוד הדנ"א היה מרוכז בגרעין התא, הרנ"א היה קיים מחוץ לגרעין, בציטופלזמה, שהיא החומר הממלא את התא. זמצ'ניק גילה שמלאכת קשירתן של החומצות האמיניות זו לזו בטור עורפי, כמו חיבור קרונות של רכבת, מתבצעת באופן פיזי על גבי הרנ"א בציטופלזמה. אבל הוא גם מצא שכל חומצה אמינית מובלת על-ידי מולקולה מיוחדת המביאה אותה לאתר הקשירה, שם היא מתחברת לחומצה אמינית שכבר נמצאת שם. פירוש הדבר היה שמשפחה של מולקולות מסוג אחר – עשרים במספר – יודעת לזהות כל אחת מעשרים חומצות האמינו השונות ולהובילן, כל אחת בתורה, אל אתר החיבור לקרון הקודם על גבי הרנ"א. אף-על-פי שקריק עצמו, מתוך שיקולים תיאורטיים בלבד, חזה את קיומן של משפחות מולקולות כאלו, אף אחד עוד לא ראה דבר כזה.

בינתיים, מעבר לאוקיינוס האטלנטי, במעבדתו של קריק, העבודה על פיצוח הקוד התנהלה בקדחתנות. אם הקוד היה בן ארבע אותיות, וצריך היה "לדעת" לקודד עבור עשרים סוגים של מילים שונות – עשרים חומצות האמינו המרכיבות את החלבון – אזי סביר היה להניח שארבע האותיות נקראות בקבצים של שלוש: AAC יכול לקודד למשל עבור חומצת האמינו lycine, ו-CGT עבור חומצת האמינו tyrosine. אחרי הכול, היות שקבצים של שתי אותיות (AG או CC, למשל) לא יצרו מספיק קומבינציות כדי לקודד עבור עשרים חומצות אמיניות שונות, הרי שקבצים של שלוש אותיות נראו כהיסק תיאורטי סביר. אך זאת אומרת הרבה יותר קומבינציות מן העשרים ההכרחיות: האם הקוד היה, אם כן, "דגנרטיבי", כלומר כל חומצה אמינית קודדה על-ידי יותר מקובץ משולש אחד של אותיות? האם היו "סימני פיסוק" בקוד או רק "מילים"? האם הקוד היה חופף – זאת אומרת שברצף ATACCG היה משמעות ל-ATA, ל-TAC, ל-ACC, ול-CCG, או שמא לא היה חופף כלל, ואז רק ל-ATA ו-CCG היתה משמעות? או אולי החפיפה היתה בכלל חלקית, ו-ATA ו-ACC בלבד היו בעלי מובן? ואיך בכלל ידע "הקורא" – שהרי אם היה קוד צריך גם מישהו שיקרא אותו – היכן ברצף הארוך להתחיל לקרוא והיכן לסיים? על כל פנים, איך הוא הגיע, הקוד, מן הדנ"א שבגרעין למקום הרכבת החלבונים על הרנ"א בציטופלזמה? קריק, יחד עם הדרום-אפריקני במעבדתו, סידני בְּרֶנֶר (Brenner) וג'ורג גאמוֹב (Gamow) – האבא של תיאוריית "המפץ הגדול" הקוסמית – ואחרים, שברו את הראש ולא מצאו עדיין תשובות.

* * *

במרחק שיט מעבורת מדוֹבֶר לקָלֶה, ועוד נסיעת רכבת לפריז, קבוצה רביעית, אולי המעניינת מכולן, שקדה על היבט נוסף של חידת החיים, בבניין עתיק בלב העיר, שם שכן אחד המוסדות המדעיים המפוארים של צרפת. לואי פסטר הקים את המכון באמצעות תרומה ציבורית בשנת 1888, בעקבות גל ההתלהבות הגואה בזכות חיסון שפיתח נגד מחלת הכלבת, וההדגמה הדרמטית, המתוקשרת, על ילד קטן, הדגמה שצלחה. פסטר הפך את המכון לפרטי, עצמאי מן הממשלה – דבר נדיר ביותר בצרפת – אף-על-פי שעל-ידי חקיקה מיוחדת הוא הוכר כבעל תועלת ציבורית. מרב ההכנסות באו מפיתוח של חיסונים ונסיובים למיניהם, אך גם ממקורות מפתיעים יותר, כמו ייצור של תרביות חיידקים חיות לטובת שימוש בהכנת יוגורט – תרביות שחולקו במשלוח כל יום בפריז לכל מי שהזמינן. שלא כמו האוניברסיטאות המנוכרות והקרירות, מכון פסטר היה לבית לכל עובדיו.

ב-1921 הגיע למכון סטודנט לרפואה בן תשע-עשרה והחל לחקור כיוון חדש, כיוון אשר לימים יחזיר את התהילה הנשכחת של ימי פסטר עצמו למכון ולצרפת כולה. אַנְדְרֶה לְבוֹף (Lwoff) גידל חיידקים בתרביות עם ויטמינים שונים במזונם וגילה, לתדהמת העולם המדעי כולו, כי ויטמינים אלו חיוניים לגדילתם של החיידקים. עד לאותה עת חיידקים נחקרו כגורמי מחלות, סוכני סחי ושתדלני התססה; תגליתו של לבוף הציגה אותם לראשונה כמערכות ביוכימיות שניתן להשוות אותן לתאים של אורגניזמים עילאיים. החיידק הוא חד-תא המתחלק ומכפיל את עצמו במהירות רבה – יש חיידקים העושים זאת מדי עשרים דקות – ופירוש הדבר הוא שמתא בודד אפשר לגדל בימֶמה מאות מיליוני תאים. במהלך שנות השלושים הוכיח לבוף את האחדות הביוכימית של כל עולם החי; ביצור פשוט זה מקופלים החוקים הביולוגיים הבסיסיים החלים על כל הברואים, מקטן ועד גדול. עולם ניסויי שלם, עשיר ונוח, נפתח בפני הקהילה המדעית.

בעוד לבוף ממשיך להאכיל את החיידקים הרעבים ויטמינים, בחור צעיר ממשפחה צרפתית מפורסמת בשם ז׳אק מוֹנוֹ (Monod) גמל בליבו להיות ביולוג. ב-1935 פגש מונו גולה רוסי, גנטיקאי בשם בוריס אֶפרוּסִי (Ephrussi), שהציע לסטודנט הצעיר והמבטיח להצטרף אליו כעוזר מחקר לשנה באוניברסיטת CalTech שבקליפורניה. מונו התלבט קשות; הוא כבר נרשם להפליג ב-?Pourquoi Pas (למה לא?) למסע מחקר של החי והצומח בגרינלנד. לבסוף נכנע לכוח השכנוע של הרוסי. אולם בקליפורניה התעוררה חמתו של אפרוסי על מונו הצעיר, שעסק מעט מאוד בגנטיקה, והרבה מאוד ברומנסות ובניצוח על הרכב מוזיקלי שהקים. מונו היה קרוע בין המוזיקה ובין המדע; במה לעזאזל יבחר? כשהגיע הזמן לחזור לפריז, CalTech הציעה לו להישאר כמורה למוזיקה. כמה שבועות לפני כן ה-? Pourquoi-Pas נטרפה בלב ים; אדם בודד ניצל. מונו החליט לשוב הביתה לסורבון, לעבוד על חיידקים כמו לבוף.

* * *

חיידקים, ככל תא חי, מפרקים חומרי מזון באמצעות אנזימים, ומנצלים את תוצרי הפירוק כמקור לאנרגיה ולחומרי גלם הדרושים לקיום התא. תוך עבודה עם סוג חיידק נפוץ בשם E. coli, החי דרך קבע במעי הגס של האדם, גילה מונו שכאשר האכיל את החיידקים בתערובת של שני סוכרים, גלוקוז (סוכר הענבים) ולקטוז (סוכר החלב), מושבות החיידקים גדלו, עד שהגדילה נעצרה בשלב מסוים, והתחדשה לאחר שהייה מסוימת. בדיקה כימית הראתה כי החיידקים פירקו תחילה את הגלוקוז, עשו הפסקה מטעם כלשהו, ואז החלו לפרק את הלקטוז. תופעה זו חזרה ונשנתה פעם אחר פעם. אך מדוע פירקו תמיד את הגלוקוז תחילה ורק אחר-כך את הלקטוז? ומדוע לא את שני הסוכרים יחדיו? מונו לא ידע את התשובה, אך היתה לו השערה: הוא הניח כי אנזים המסוגל לפרק גלוקוז נמצא מן המוכן בתאי החיידקים, אולם אין להם אנזים מוכן לפירוק לקטוז; החיידק זקוק למיפגש עם הלקטוז עצמו, כך סבר, כדי לייצר אנזים חדש שידע לפרק אותו. זה הסביר את סדר הפירוק ואת השעיית הגידול. מונו כינה את התופעה ״אדפטציה אנזימטית״ שפירושה הוא שהחיידק מסתגל לסביבה חדשה ויוצר את המולקולות הנחוצות בהתאם לחומר המזון הזמין לו. שאלה אחת שעלתה מייד היתה: מדוע האנזים המפרק לקטוז לא נוצר מייד, עוד לפני שהחיידקים כילו את הגלוקוז? מונו סבר כי התשובה היא עניין של חיסכון במשאבים: ייצור אנזים, כלומר חלבון רב-חומצות אמיניות, הוא עניין הדורש השקעת חומרי גלם ואנרגיה; כל עוד יש די גלוקוז בסביבה, קיים כנראה מנגנון כלשהו המונע מן החיידקים לייצר אנזים נוסף, שאינו חיוני. ברגע שמתכלה המזון הזמין, ויש צורך באנזים אחר, מפסיק מנגנון העיכוב לפעול, ומתחיל ייצור האנזים הדרוש. אולם כל הרעיונות האלה לא חרגו באותם ימים מגדר ספקולציה. איש לא ראה שום מנגנון עיכוב, או משהו דומה לו.

ואז חלה השעיה בעבודתו של מונו: בספטמבר 1939 פרצה המלחמה, וב-1943 הצטרף מונו לתנועת ההתנגדות, הרזיסטנס וירד למחתרת.

חברי רזיסטנס שהכירו אותו, וידעו היכן עבד, נשבו על-ידי הנאצים, ומונו היה מנוע מלשוב למעבדה שלו בסורבון. אבל לא נשקפה כל סכנה שהגסטפו יחפשו את מעבדתו במקום אחר! וכך, בסתיו הצטרף מונו ללבוף בעליית הגג הצפופה של הקומה השלישית במכון פסטר והמשיך לעבוד על E. coli ועל סוכרים. יחד עם חוקרת בשם אליס אוֹדרוֹ (Audreau) אף גילה משהו שבערך באותו הזמן גילו יחדיו שני חוקרים נוספים: פליט יהודי איטלקי שברח מפריז על אופניים יום לפני כניסתם של הגרמנים, והתיישב בינתיים בארצות-הברית – סלבדור לוריא (Luria)

והפיזיקאי-ביולוג הגרמני מקס דלברוק, אף הוא כעת באמריקה. שני הצוותים גילו כי לחיידקים, ממש כמו ליצורים עילאיים, יש גנים. וכך, באמצע כל הטירוף שמסביב, הוכה העולם המדעי בתדהמה בריאה יותר. לבוף צדק יותר מכפי שאי-פעם דימיין לעצמו! האמריקנים אדוארד טאטום (Tatum) וג'ורג' בידל (Beadle) כבר הראו כמה שנים קודם-לכן כי מה שגן עושה הוא לקודד אנזים. האם אפשר הדבר, אם כן, שההסתגלות של החיידקים של מונו כלל לא היתה הסתגלות מופשטת, אלא שבנוכחות הלקטוז יש הפעלה ספציפית – אינדוקציה – של גן היוצר את האנזים הדרוש לפירוק הסוכר? "בעיית ההסתגלות" הפכה כעת ל"בעיית ההפעלה".

באוגוסט 1944, בפלישה הגדולה של בעלות הברית לחופי נורמנדי, סטודנט לרפואה בן עשרים וארבע נפגע קשות מפגז רסס שנעץ למעלה ממאה רסיסים בגופו . שמו היה פרנסואה ז'קוב.

* * *

במכון פסטר החל לבוף לחקור תופעה שכבר שיגעה דור של חוקרים במכון: זן מסוים של פאג' (phage), נגיף התוקף ומשמיד חיידקים הגדולים ממנו בהרבה, חדר לפעמים אל תוך זן מסוים של חיידק, ונעלם. מושבת החיידקים המודבקת המשיכה לגדול באין מפריע, ואף נהפכה לעמידה בפני חדירות נוספות של הפאג'. התופעה המוזרה נקראה ליסוגניות (lysogeny), ולבוף הסיק ממנה שהפאג' מתחבר ונטמע בדנ"א של כרומוזום החיידק. הוא קרא לנגיף הלטנטי ה"רדום" הזה פרופאג', וגילה שניתן לעוררו – כלומר לגרום לו להתחיל לשכפל את עצמו – על-ידי הקרנה אולטרה-סגולה או טיפול בכימיקלים שונים. הנגיפים המשוכפלים בחיידק בוקעים מתוכו תוך שהם ממיתים אותו, ומשתחררים לסביבה במספר עצום ורב לקראת תקיפה מחודשת. לתופעה הזו קרא "אינדוקציית פְּרופאג'".

פרנסואה ז'קוב הספיק בינתיים להתאושש מן הפציעה ופנה להמשיך בחייו. המלחמה תמה, והוא סיים במחצית הזמן המקובל את לימודי הרפואה שלו. רסיס עיקש בידו מנע ממנו להפוך לכירורג, וז'קוב לא ידע לאן לפנות. תחילה ניסה את מזלו כעיתונאי; לאחר-מכן כחוקר אנטיביוטיקה זוטר בחברה לייצור פצצות שהיתה באמצע ניסיון (לא מוצלח במיוחד) לעבור הסבה לחברת תרופות. לבסוף נרשם ללימודי ביולוגיה במכון פסטר. שם ניגש יום אחד ודפק בדלת מעבדתו של לבוף. "סיפרתי לו על משאלות לבי, על בורותי, על תשוקתי", זכר ז'קוב. "הוא הביט בי ארוכות בעיניו הכחולות, הגדולות, נד בראשו ואמר: "בלתי אפשרי! אין לי ולו טיפת מקום!" ז'קוב שב וחזר – שלוש או ארבע פעמים לפי לבוף, שבע או שמונה פעמים לפי גירסתו שלו – עד שניסה בפעם האחרונה ביוני 1950. "בלי שאיפשר לי להסביר את משאלות לבי, את בורותי, את שקיקתי, הודיע בהתרגשות: 'אתה יודע, גילינו את אינדוקציית הפרופאג'!' עניתי 'או!', בניסיון מאולץ להישמע נפעם, בעוד אני אומר לעצמי "מה זה, לעזאזל, פרופאג'?" ... אז הוא שאל אותי: 'האם תהיה מעוניין לעבוד על פאג'?' עניתי שזהו בדיוק הדבר שאליו פיללתי יותר מכול. "יופי! אם כן, חזור בראשון לספטמבר". ירדתי במדרגות, פניתי לרחוב, ונכנסתי לחנות הספרים הראשונה למצוא מילון".

ז'קוב התחיל לעבוד בעליית הגג של מכון פסטר, שם, בקצה אחד של המסדרון הקרין לבוף אור אולטרה-סגול על חיידקים מאכסני פרופאג', ובקצהו השני הציע מונו לחיידקי ה-E. coli שלו (שהוצאו מן המעי של לבוף) סוגים מסוגים שונים של סוכרים. שניהם עסקו במשהו שקראו לו אינדוקציה, אך לא חשבו לרגע שיש קשר בין עבודותיהם.

* * *

בינתיים, מעבר לים, התרחשו התפתחויות מרגשות בעולם המדע. כבר ב-1946 סטודנט צעיר בן עשרים מאוניברסיטת יֵיל, ג׳ושוע לדרברג (Lederberg), הוכיח בניסוי יפהפה שחיידקים, לפעמים, הולכים בדרך כל חי: חיידקים עושים סקס! התגלית היתה מרעישה, שכן המשמעות שלה היתה שניתן לזווג בין חיידקים, למצוא מוטנטים, למַפּוֹת גנים, ולהסיק מסקנות חשובות לגבי הביוכימיה והבקרה הגנטית של התא. חמש שנים לאחר-מכן, סימור בנזר, שבילה שנת מחקר במכון פסטר, חצה את התעלה לאנגליה עם לבוף, פגש את ווטסון ואת קריק, ושמע מביוכימאי אנגלי בשם ויליאם הֵייז (Hayes) על תגלית מדהימה נוספת: כשחיידקים עושים סקס, ישנו ״תורם״ וישנו ״מקבל״; אין אצל החיידקים הבחנה בין ״זכר״ ל״נקבה״, והזיווג איננו שוויוני כמו בבעלי חיים וצמחים עילאיים, שם כל משתתף בזיווג תורם מחצית מן הגנים לדור הבא. כאן ה״תורם״ תורם הכול. הֵייז הראה שהתכונה ״תורם״ עצמה היא תורשתית, מקודדת בגן יחיד וניתנת להעברה מחיידק לחיידק באמצעות סקס. פירוש הדבר שאם התורם העביר למקבל את הגן לתכונה ״תורם״, הרי במפגש הבא, זה שהיה ״מקבל״ הופך ל״תורם״. לדרברג גילה בחיידקים את הסקס; הייז גילה בהם את שינוי המין.

בתוך כך, מעבדתו של זמצ׳ניק הצליחה לבודד את משפחת המולקולה החמקנית שקריק טען כי היא חייבת להימצא, זו ש״הסיעה״ את החומצות האמיניות למקום הרכבת החלבון על הרנ״א. והנה התברר שמולקולות אלו גם הן סוג של רנ״א! התברר כי הרנ״א לא היה דבר אחד, כי אם שניים: חלקיקים שנקראו אז מיקרוזומים (לימים, ריבוזומים, המהווים אתר לבניית חלבונים, ורנ״א מסיס (לימים, transfer RNA) המפוזר בציטופלזמה. במעבדתו של קריק, הביוכימאי האנגלי וֶרנון אינגרם (Ingram) הראה כי מוטציה בגן המקודֵד את המולקולה הנושאת חמצן בדם – ההֶמוגלובין – גורמת לשינוי בחומצה אמינית אחת בחלבון, וגורמת בתוך כך למחלת האנמיה של תאי המגל; סוף-סוף הוכח מעבר לכל ספק הקשר בין הדנ״א ובין רצף החומצות האמיניות המרכיבות את החלבון, וגם הקשר בין רצף החומצות ובין תיפקוד החלבון. באותה שנה ניסח קריק את הרעיון שזכה לכינוי ״הדוגמה המרכזית״ של הביולוגיה המולקולרית החדשה: דנ״א מיתרגם למידע ברנ״א וזה מיתרגם לחלבון. נהוג להציג את הדוגמה המרכזית בצורת תרשים המראה את זרימת המידע בדרך זו:

דנ״א ← רנ״א ← חלבון

החיצים מדגישים את החד-כיווניות במעבר המידע. הדוגמה העניקה אישוש רב עוצמה, ברמה המולקולרית, לחשיבותן של מוטציות באבולוציה. הדוגמה המרכזית אומרת למעשה את הדבר הבא: כל תכונה נמצאת תחילה בדנ״א; גם כל שינוי בתכונה – מוטציה – חל תחילה בדנ״א. מן הדנ״א עובר המידע, בתהליך המכונה תעתוק, לרנ״א, והמידע שברנ״א מתורגם לחלבון, כלומר, לחומר הבונה בפועל את התאים, הקובע את תכונותיהם, את המבנה ואת אופן התיפקוד שלהם. ולא פחות חשוב: אין מעבר מידע בכיוון ההפוך, מחלבון לדנ״א. הרעיון הנושן של למארק, כאילו תיתכן תורשה של תכונות נרכשות, הופרך עתה באופן סופי: מן הרגע שאינפורמציה נכנסת לחלבון, היא איננה יכולה לצאת משם יותר.

אך למרות כל התגליות, תשובות לשאלות בסיסיות נותרו ללא מענה. כיצד הגיע המידע– זה המקודד בדנ״א – מן הגרעין לציטופלזמה? כיצד ״נקרא״ שם? איך ידע התא ״להדליק״ גן זה או אחר בזמן הנכון ולמטרה הנכונה – למשל, כאשר התא קיבל לקטוז במזונו והיה צריך לייצר את

האנזים הדרוש לפירוקו? כיצד, למעשה, ניהל התא את הבקרה של פעילותו שלו עצמו? שאלות אלו נותרו עלומות. כאשר שני חוקרים רוסים פרסמו מחקר ב-1958 ובו טענו שהרכב הדנ״א של סוגי חיידקים שונים היה מגוון מאוד, למרות שהרכב הרנ״א שלהם היה כמעט זהה, נראה היה שאולי הדוגמה המרכזית כולה מוטעית. אם הדנ״א אכן מקודֵד רנ״א שמקודד חלבון, הרי שהרכב הדנ״א והרכב הרנ״א צריכים להיות דומים, והנה נדמה היה שהשניים לגמרי עצמאיים! קריק נכנס לדיכאון.

* * *

היו אלו הצרפתים שהחלו להתיר את הסבך, ובקבוצה שלהם שימש ז׳קוב כקטליזטור ראשי. יחד עם אלי וולמן (Wollman), בנם של זוג מדענים יהודים ממכון פסטר שהיו מן הראשונים שחקרו את תופעת הליזוגניות, לפני שנשלחו לאושוויץ ללא שוב, ז׳קוב הציע כי ״התורם״ מעביר את הגנים שלו על גבי כרומוזום שחודר בקצב מדיד אל תוך תאו של ה״מקבל״. אם הסקס בין החיידקים הופסק אחרי עשר דקות, גן A הספיק לעבור; אם עצרו אותו אחרי חמש-עשרה דקות, עברו גנים A+B; אם הוא נמשך עשרים דקות, הספיקו לעבור A+B+C וכן הלאה. ״השערת הספגטי״, כפי שקראו לה, איפשרה לשניים לפתח שיטה יעילה למיפוי הגנים האחראים לתכונות ביוכימיות של התא, כפונקציה של יחידות זמן ה״הזדווגות״ בין החיידקים. במקביל, ז׳קוב, מונו, והביוכימאי האמריקאי ארתור פַּרְדִי (Pardee) ערכו ניסוי היסטורי שבו רשמו את רעיון הספגטי שז׳קוב פיתח בעבודה על חיידקים מאכסני פרופאג׳, לחיידקים אוכלי הסוכר של מונו. לניסוי הם קראו PaJaMo – קיצור שמות שלושת מבצעיו.

ואז קרה דבר גדול. בעוד ז׳קוב עובד בביתו בבוקר יום ראשון עצל, הכתה בו באחת התובנה: תופעות האינדוקציה שחקרו לבוף ומונו בשני קצות המסדרון בעליית הגג של מכון פסטר היו אותה תופעה ממש! בדיוק כשם שייצור אנזים המסוגל לפרק את הלקטוז מעוכב על-ידי מעכב הפועל תחת בקרה גנטית, כך העמידות בפני הפרופאג׳ היא תוצאה של מעכב הפועל תחת בקרה גנטית! ז׳קוב חשב על דגם שיסביר את הכול: על גבי הדנ״א, בנקודה קרובה לקבוצה ספציפית של

גנים הקשורים כולם לאותו תחום פעילות – ז׳קוב קרא לקבוצה כזו אוֹפֶּרוֹן (operon) – ישנו מעין מפסק שניתן להדליקו ולכבותו – ה-operator. במקום כלשהו בדנ״א, לא בהכרח קרוב, נמצא גן שהתפקיד שלו הוא לקודד מעכב – repressor – היודע להתיישב על המפסק ולבקר את מצבו: כשהוא פתוח, הגנים שבאופרון מתבטאים, מקודדים חלבונים, וכשהוא כבוי, האופרון נותר דומם. כאשר החיידק נחשף למקור מזון הדרוש לו, למשל סוכר מסוים, נעצר ייצור המעכב של האופרון המקודד את האנזים היודע לפרק את הסוכר: האנזים מיוצר והסוכר מפורק; כאשר פרופאג׳ מוכן לבקוע מן החיידק שבתוכו התנחל, הוא גורם לעיכוב בעמידות של מארחו, פורץ החוצה, מרסק בתוך כך את המארח ומדביק תאים סמוכים. הדגם של ז׳קוב היה לא פחות מדגם מלא של הבקרה הגנטית של התא, ושוב ניצב עולם המדע נפעם. הרי בדמיונם של אנשים הגן היה בלתי נגיש בדיוק כמו הכוכבים המרוחקים בגלקסיה, והנה ז׳קוב ומונו ערכו ניסויים שבהם התחוללו תהליכים ממש על הגן עצמו! המחשבה שהבקרה של ״הדלקה״ ו״כיבוי״ של גנים כפונקציה של הצרכים של האורגניזם נעשית באופן ממשי על הדנ״א, ולא באתר נמוך יותר בשרשרת המידע, כמו הדנ״א או החלבון, או בחומרי הבניין המרכיבים אותם, היתה מעבר לכל הציפיות.

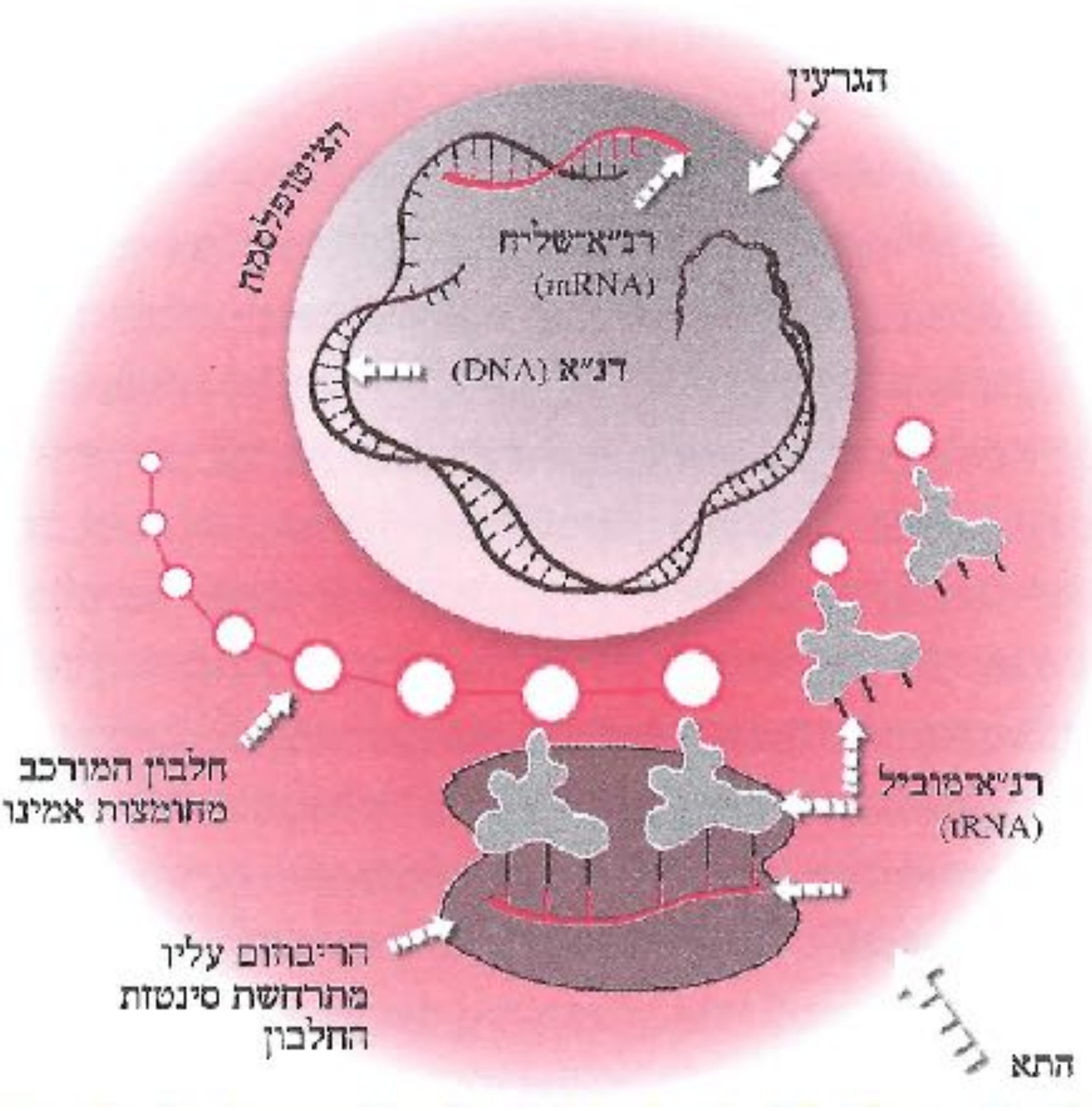
אך ניסוי ה-PaJaMo הוביל לא רק לדגם הבקרה המפתיע של ז׳קוב ומונו, אלא גם לפתרון כל השאלות שצמחו מפענוח הקוד הגנטי. באמצעות סדרת המוטַנטים שפיתח בנזר, הצליחו קריק וברנר לאפיין את תכונותיו של הקוד. הוא אכן דגנרטיבי, כלומר יש עודף של קודים על פני חומצות אמיניות, הוא אכן נקרא בקבוצות של שלושה בסיסים – ברנר נתן לשלשה כזו את השם קודון – יש בו סימני פיסוק, והוא איננו חופף – כלומר הצירוף ATTCAG למשל, מכיל רק שני קודונים: ATT ו-CAG, ולא יותר. התגליות הללו הן סיפור מרתק בפני עצמו, והן מהוות דוגמה לחשיבה מדעית יצירתית – פיוטית ממש – מן הסוג המשובח ביותר. אך למרות הכול, למרות שכללי השפה היו כולם במקום, לקריק ולברנר לא היה כל מושג מהו פשר השפה – דהיינו, איזו מעשרים חומצות האמינו קודד כל קודון, כל שלשת בסיסים. מעבר לכך, איך לכל הרוחות הגיע הקוד מן הגרעין אל הציטופלזמה – אשר היה ידוע כי בה נוצרים החלבונים?! איש לא ידע.

ואזי ביום שישי הטוב – Good Friday – ה-15 לאפריל 1960, ז׳קוב, קריק וברנר נפגשו בחדדו של ברנר בקינג׳ז קולג׳ בקיימבדידג׳, כדי לנסות ולאגד את מחשבותיהם לכיוון פתרון החידות העקשניות. כשז׳קוב סיפר על אחת התוצאות של ניסוי ה-PaJaMo – המהירות המפתיעה שבה מתחיל החיידק לייצר את האנזים מפרק הלקטוז, לאחר שגן הבקרה נכנס לתוכו על גבי הספגטי – אצל קריק נפל האסימון: חייבת לחיות מולקולה קטנה, בלתי יציבה, המתפרקת מהר ולכן קשה לאיתור, מולקולה המעתיקה את קוד הדנ״א בגרעין ומעבירה את העותק לציטופלזמה, שם הוא משמש כתבנית ליצור החלבונים על גבי הריבוזומים. חמש שנים קודם-לכן שני חוקרים אמריקנים, וולקין ואסטרחאן (Volkin and Astrachan), מצאו במקרה מולקולת דנ״א בעלת אותן תכונות בדיוק, אבל לא היה להם כל מושג מה תפקידה, והתגלית נותרה בלתי מובנת. עכשיו קריק הבין: הרנ״א של וולקין ואסטרחאן היה השליח! פריז כבר גילתה (תאורטית) את הרנ״א-שליח (RNA messenger) אך לא שמה לב!!

לפתע, התמונה כולה התבהרה. הרנ״א איננו רק דבר אחד, או אפילו שניים, כי אם שלושה! הרנ״א-שליח מעתיק את הקוד מן הדנ״א, ועובר לציטופלזמה. שם, מולקולות רנ״א-מוביל המונחות על-ידי הקוד מובילות חומצות אמיניות ועורכות אותן על גבי הרנ״א הריבוזומי, המרכיב בתורו את החלבונים השונים, לרבות האנזימים, של התא. הטריז הרוסי הוסר כעת בלא מפריע: הרנ״א העצמאי שהם זיהו היה האחרון בשרשרת הייצור, ולא השליח הקטן והחמקני . לכן היה נדמה כאילו אין קשר בין הדנ״א לרנ״א! הדוגמה המרכזית קמה שוב לתחיה!

סליל הדנ״א הכפול נפתח ומולקולת רנ״א-שליח מעתיקה את קטע הדנ״א המבוקש. המולקולה יוצאת מן הגרעין אל הציטופלסמה ומתיישבת על ריבוזום. מולקולות רנ״א-מוביל הנושאות כל אחת חומצה אמינית אחת, מתיישבות על הקודון המתאים ברנ״א-שליח. שרשרת חומצות האמינו על גבי הרנ״א-מוביל יוצרת חלבון שאותו קודד מִקטע הדנ״א המקורי בגרעין.

Protein Synthesis סינטזת החלבון



מכאן ועד פיצוח הקוד היתה הדרך קצרה. אם הרנ"א אכן שימש תבנית ליצירת חלבונים, כל שהיה צריך לעשות הוא ליצור קטעי רנ"א מלאכותיים שהרכב הבסיסים שלהם ידוע, ולראות אילו חומצות אמיניות הם מרכיבים. הרעיון היה פשוט, אולם הביצוע הטכני קשה הרבה יותר. בעולם כולו נפתח מירוץ מטורף אחר פיצוח הקוד. לבסוף, חוקר ביישן ולא נודע בשם מרשל נירנברג (Nirenberg) החל לטפטף את המילים הראשונות בשפת החלבונים – שפת הבניין של התא החי וכל אשר בו. הקודון UUU (זכרו – ברנ"א יש U במקום T) מקודד את החומצה האמינית פניל-אלנין; CCC מקודד את החומצה פרולין... בתוך כמה שנים הקוד פוצח במלואו.

***

בשנת 1965 לבוף, מונו, וז׳קוב נסעו לשטוקהולם לקבל את פרס נובל. הם היו המדענים הצרפתים הראשונים מזה שלושים שנה שזכו בפרס הנכסף, והפכו בין לילה לגיבורים לאומיים בארצם. לבוף, המבוגר יותר, פרש, ואילו מונו התמנה לראש מכון פסטר, ולא עסק יותר במחקר של ממש. רק ז׳קוב המשיך להגיע למעבדה מדי יום ביומו, מגשש כמו תמיד אחר תשובות לשאלות חדשות.

הוא הניח את התשתית להבנת התהליכים הגנטיים הבסיסיים בעולם החי, אך הבין שכדי לענות על שאלות מעניינות באמת, למשל איך מביצית מופרית אחת – תא זעיר אחד ויחיד – נוצרים יד, לב, מעי, ומוח בן מליוני תאים המסוגל להבין את העולם המופלא שבו אנו חיים – כדי לעשות כל זאת צריך להסתכן בצעדים אמיצים קדימה. מה שנראה לו אך זה עתה כסימפוניה מופלאה, לא היה יותר מפְּרֶלוּד, ומלאכת ההלחנה היתה רחוקה מלהיות מושלמת. אגב כך, במעבר הקשה ביותר שמדען יכול לעשות, החליף ז׳קוב את מערכת החיידקים הידועה והנזוכרת, שעליה עבד שנים, באורגניזם דגם חדש, בלתי מובן, ומורכב שבעתיים – העכבר – והמשיך כדרכו לשאול את השאלות הקשות:

האם ניתן להבין את החיים במובנם הביולוגי כתופעה המוסברת על-ידי חוקי הכימיה והפיזיקה הידועים לנו? או שמא רדוקציה שכזו איננה קבילה, וחוקים אחרים, מחוץ למה שמכיר המדע – אולי חוקים כמו אלו שדימיין שרדינגר, ואולי לא – הם המניעים את סוד החיים? האם המיתולוגיה החדשה של האקראיות האבולוציונית אכן מצליחה להחליף את המיתולוגיה הישנה של כוונת המכון האלוהי? האם השונות הביולוגית האדירה שהביו-רפואה מתחילה כעת לגלות משמעה בהכרח אי-שיוויוניות חברתית ופוליטית? האם היא מערערת על ההנחות של הליברליזם המערבי? ובתוך כל זאת, מה מקומו של המדען? עד כמה, ובאיזה אופן, חשוב קולו בחברה בימינו, וכשותף במסכת ההחלטות אשר מולן יעמדו הדורות הבאים? על השאלות האלו ועל התשובות להן ועל השאלות החדשות הנובעות מן התשובות, תקראו בספר שלפניכם. החיים, אלוהים יודע, אינם אגוז קל לפיצוח. וכבר כתב הסופר שטפן היים כי ״מאחורי כל דבר מסתתר דבר אחר ומאחוריו שוב דבר אחר וחוזר חלילה, ואין לך דבר בעולם אשר תוכו כברו, והאמת חבויה מאחורי קליפות הרבה, קליפה לפנים מקליפה״.

אורן הַרמן

ירושלים , חורף 2004

פרנסוא ז׳קוב - **העכבר, הזבוב והאדם**

מבוא

אך לאיזו תכלית נוצר אם כן העולם? אמר קַנְדִיד.
- כדי להכעיס אותנו, ענה מַרְטֶן.
וולטר, **קנדיד**.

בסיפורו **הבריאה** מספר דינו בוצטי כיצד הגשים הכל-יכול את יצירתו. בראשית הוא בנה את היקום, ובפינה אחת שלו כדור קטן, כוכב לכת בנוי בצורה המאפשרת תופעה מאוד מוזרה ומשעשעת: החיים. ״הרעיון של כדור קטן זה, התלוי לו באינסופיות המרחבים, נושא עליו המוני יצורים אשר ייוולדו, יגדלו, יתרבו וימותו, נראה לבורא מסקרן.״

עד מהרה נחפזו ובאו המוני מלאכים-אדריכלים, מבקשים להציג את דגמיהם לאינספור המינים של היצורים החיים, צמחים וחיות, הנחוצים להצלחת כוכב הלכת החדש. לאחר ויכוחים לרוב עם הוועד המנהל, אישר לבסוף הכל-יכול את מרבית התכניות הללו. עם זאת, נותר טרדן אחד שאינו מצליח למשוך את תשומת לבו של האל. בסופו של דבר, הוא מצליח להתגנב ולהגיע אל רגלי הבורא. ציוריו מציגים חיה שחזותה באמת אינה נעימה, כדי לא לומר דוחה, אך היא

מפתיעה, שכן היא שונה לחלוטין מכל מה שנראה עד כה. מצד אחד מוצג הזכר, מצד שני הנקבה. כמו הרבה חיות אחרות, יש להם ארבע גפיים, אך – לפחות, אם לשפוט לפי הציורים – הם משתמשים בשתיים בלבד כדי ללכת. ללא שיער, להוציא כמה אניצים פה ושם, בעיקר על הראש. הבורא נראה מאוד לא נלהב. הטרדן מתעקש: זו תהיה המצאה יוצאת מן הכלל; זה יהיה היצור היחיד בעל בינה, היחיד שיוכל לעבוד את הבורא, להקים מקדשים לכבודו, לפתוח בשמו במלחמות רצחניות נוראות. "אתה רוצה לומר שזה יהיה אינטלקטואל", אומר הכל-יכול באימה, "הכול ורק לא זה!" הממציא של האיש והאישה מתרחק במורת רוח.

כדור הארץ נולד. עם נפלאותיו ואכזריותו, תענוגותיו וחרדותיו, עם האהבה והמוות. הוא מתמלא ביצורים שונים ומגוונים, מקסימים ונתעבים, נעימים ופראיים, נוראים וחסרי ערך, יפים ודוחים. הנָדל, האלון, השרשור, העיט, הנמייה, האיילה, שושנת האַלְפִּים. האריה! הליל יורד. האל, עייף אך מרוצה, מתנמנם. הוא חש לפתע כי מישהו מושך בכנף בגדו: זה הטרדן, ממציא הזוג האנושי, החוזר ומפציר בו. איזה רעיון מטורף, אפילו מסוכן! חושב הבורא. אבל איזה משחק מרתק, איזה פיתוי! ובעודו חצי ישן, הוא מסכים לתכנית הגורלית ("הבריאה", מתוך הספר (Buzzati, Dino – **Le K.**. Paris, Robert Laffont, 1967).

יש צורך בהרבה תושייה – אפשר כמעט לומר סטייה – בהרבה ידע נרכש כנגד כל הראָיות של תפיסת המציאות בחושים, כנגד כל האינטואיציות, כדי להצליח למצוא מאחורי המגוון העצום של צורות החיים אַחדות של מאפיינים משותפים, אם לא של תכונות משותפות. במבט ראשון, החיות שיצאו מתיבת נוח נראות כאילו נֶהגו כל אחת לחוד על ידי אמן שדמיונו פרח בצורות שהעניק למגוון של החי. מוזרות עוד יותר נראות תכונות מסוימות, כגון להיוולד, לגדול ולהזדקן, תכונות שאי אפשר כלל להבין מה דחף את האמן להפכן לגורלם המשותף של החיים. במיוחד, אותו הכרח שיש לאוכלוסיות להיעלם לאיטן באמצעות המוות ולהתחדש על ידי ההתרבות.

מאז לידתה, בראשית המאה ה-19, לא חדלה הביולוגיה לחקור את המבנים ולהעמיק את הבנת התפקידים. למרות זעקותיהם של אלה המצהירים על כך שבעלי החיים אינם ניתנים לחלוקה, ההשקפה הרֶדוּקציוניסטית נחלה ניצחון אחר ניצחון. וככל שהתקדם המחקר, כן נעלמו ההבדלים בין האורגניזמים השונים והתאשרה האחידות של בעלי החיים. באמצע המאה ה-19 הוכיח מחקר התאים את אחידות המבנה, מעין האטום של החי. אחר כך, עם תורת האבולוציה, התאשרה אחידות המוצא. לפני מלחמת העולם השנייה הוכיחו הביוכימאים את אחידות המבנים והתפקודים שמאחורי מגוון הצורות. החל משנות השישים של המאה העשרים הראתה הביולוגיה המולקולרית את אחידות המערכות הגנטיות והמנגנונים הבסיסיים המארגנים את התא. לבסוף, מאז שנות השבעים של המאה העשרים, עם הופעתה של ההנדסה הגנטית, הגיעו הראיות בדבר האחידות של עולם החי לשלב שאיש לא היה מסוגל לדמיינו לפני כן. כל היצורים החיים על פני אדמה זו, יהיו אשר יהיו סביבתם, גודלם, אורח חייהם, בין אם מדובר ברכיכה או בסרטן-ים, בזבוב או בג'ירפה, כולם, כך מסתבר, מורכבים ממולקולות פחות או יותר זהות. ויש אפילו, מן השמרים ועד האדם, רצף של קבוצות מולקולות, הקשורות באופן הדוק למילוי תפקידים כלליים, כגון חלוקת התא, או העברת צפנים מקרום התא אל גרעינו.

וכך מתחוור כיום פרדוקס פנטסטי: יצורים בעלי צורות שונות מאוד בנויים מאותן סוללות גֶנים. מגוון הצורות מקורו בשינויים קטנים במערכות הוויסות השולטות בצירופי הגנים הללו. המבנה של בעל חיים בוגר הוא תוצאה של התפתחות העובר שהולידו. אם גן יופעל קצת מוקדם יותר או קצת מאוחר יותר במשך אותה התפתחות, אם יפעל יותר ברקמות קצת שונות, התוצר הסופי – החיה הבוגרת – יהיה שונה באופן יסודי. וכך, למרות ההבדלים העצומים ביניהם, לדגים

וליונקים יש פחות או יותר אותם גנים, כמו גם לתנינים ולדרורים. יכולת היצירה של מערכות הווסתים, מקורה בטבע ההירכי והצירופי שלהן. שינויים ניכרים של צורות בעלי חיים יכולים להיווצר בכמה רמות, פשוט על ידי פעולה של גנים ווסתים רבים על המערכות, וסתים הקובעים את הרגע שבו פועל גן זה או אחר. הדמיון של הגנים השולטים בהתפתחות העוברית של האורגניזמים השונים, הוא המאפשר בסופו של דבר התפתחות צורות מורכבות. אילו כל מין חדש היה דורש את עיצובן של מערכות ויסות חדשות כדי להופיע, לא היה הזמן מספיק כדי לאפשר את ההתפתחות כפי שמתארת אותה הפליאונטולוגיה (חקר המאובנים). הפעולה האבולוציונית היא המאפשרת ליסודות הוויסות להתחבר למערכות של התפתחות מגוונת.

כל היצורים החיים מורכבים אפוא מאותם יסודות המוסדרים באופנים שונים. עולם החי הוא מעין צירוף יסודות במספרים סופיים והוא דומה למוצר של מֶכָנוֹ

ענק, תוצאה של פעולה בלתי פוסקת של האבולוציה. יש בכך שינוי מוחלט של נקודת הראות, שינוי שהתחולל בעולם הביולוגיה במהלך השנים האחרונות.

אנשים רבים אינם מבינים כיצד החוקרים מתעניינים בשאלות הנראות להם חסרות כל עניין. הם שואלים את עצמם מדוע המדענים אינם עוסקים בבעיות חשובות באמת, כגון החיים, המוות, הנזֶלת או נשירת השיער. אך שום חוקר מעולם לא זכה לפרסום כלשהו מבלי שמצא דבר. לפי דבריו של פטר מֶדָאוּאָר (Medawar, Peter – **The Art of the Soluble**, London, Methuem & Co., 1967), אם הפוליטיקה היא אמנות האפשרי, המחקר הוא אמנות הפתיר. למעשה, המדענים מתמודדים עם מה שנראה להם חשוב ביותר בין הבעיות שנראות להם נגישות; כלומר, אלה שנראה להם, בצדק או שלא בצדק, כי יוכלו למצוא להן פתרון. שכן מקצועם אינו להתלבט בלב הבעיות בלבד, אלא גם למצוא להן פתרונות. כמו בהרבה פעילויות אנושיות, כמו בחיים בדרך כלל, המדען מנתב את דרכו בין שני קטבים: הנכסף והאפשרי. בלי האפשרי, הנכסף אינו אלא חלום. בלי הנכסף, האפשרי אינו אלא שעמום. לעתים קרובות קשה לעמוד מול החלום והאוטופיה. אך הניסוי מאפשר לרסן את הדמיון. בכל שלב נאלץ המדען להיחשף בפני הביקורת והניסוי כדי להגביל את חלקו של החלום בתמונת העולם שהוא מגבש. הגישה המדעית משמעה לעמת ללא הרף את מה שעשוי להיות עם מה שישנו.

כדי לתקוף בעיה חשובה, כדי שיהיה סיכוי סביר למצוא לה פתרון, חייב הביולוג לפנות אל חומר מתאים; חומר שיאפשר לבצע סוגים מסוימים של ניסויים הנדרשים למחקר המתוכנן. בראשית המאה העשרים, כאשר מורגן (Thomas Hunt Morgan) רצה לנתח את התורשה, הוא השתמש בזבוב התסיסה (דרוזופילה – Drosophila), שאִפשר לו לפתור את הבעיה של העברת התכונות. באמצע המאה היה צריך להבהיר את טיבה הכימי של התורשה, לנתח את התפקידים הבסיסיים של התא. לשם כך הוצרכו מדעני הביולוגיה המולקולרית לפנות אל החיידקים, שרק הם התאימו למחקר כזה. מאוחר יותר, כאשר ההנדסה הגנטית אפשרה לגשת אל החומר הגנטי של כל אורגניזם שהוא, זכה זבוב הפירות שוב לשעת חסד. הוא הציע את האפשרות לחקור בפעם הראשונה את היסודות הגנטיים של התפתחות העובר ואת התפקידים העיקריים של האורגניזם. לאחר מכן, התגלית המדהימה של שמירת אותם מבנים מווסתים לכל אורך הדרך של האבולוציה, אִפשרה לגשת אל מחקר היונקים, ובמקרה זה: העכבר. מכאן הצורך לביולוגים שחיו בתקופה זו, כמוני, לשנות את חומר המחקר, לעתים אפילו פעמים מספר.

בסוף שנות השישים היה ברור כי מרכז הכובד של המחקר עומד להעתיק את מקומו. מחקר החיידקים והנגיפים, גם אם עוד היה בו כדי ללמדנו הרבה, הלך וקיבל בהדרגה חשיבות משנית.

אם לא רצית לדשדש ולדוש באותן שאלות, היה עליך לאזור אומץ ולזנוח מחקרים ישנים וחומר ישן כדי לפנות אל בעיות חדשות ולחקור אותן עם חומרים מתאימים.

המלה אומץ אינה חזקה מדי. ההתרועעות היומיומית במשך שנים עם אורגניזם חי, צנוע ככל שיהיה, יוצרת לבסוף קירבה מסוימת אליו, אפשר כמעט לומר חיבה כלפיו. בחמש עשרה שנות מחקר של חיידק קולי (Colibacille) צברתי מאות מוטציות. בכל אחת ממוטציות אלה שוּנָה תפקוד זה או אחר מתפקודי התא, רבים מהם מהחיוניים לחיי החיידק ולהתרבותו. לזנוח את כל מה שחומר כזה יכול היה להביא; לוותר על סוג זה של אינטימיות שמעניקה הכרת התחבולות הקטנות הבלתי כתובות; הפולקלור סביב העבודה על האורגניזם הזה; להתחיל מאפס עם אורגניזם אחר לא ידוע, שיש לגלות את כל צפונותיו, את כל רגישויותיו – בכל זה היה משום קורבן לא קטן. קצת כמו לעזוב יצור אהוב. אך בה בעת, היה זה מיזם מלהיב: להיכנס אל עולם לא נודע, להתחיל חיים חדשים, לחדש נעורים...

מדובר כאן במולקולות, בהִתרבות ובפעולת האבולוציה. מדובר גם בדרך שבה פועלים הביולוגים, שבה הם בוחנים את היפה והאמיתי, את הטוב והרע. בשנים האחרונות נתתי מספר הרצאות, בצרפת ובארצות אחרות, שבהן נגעתי בנושאים אלה. הרצאות אלה סיפקו לי את החומר שבעקבותיו לקחתי על עצמי לכתוב ספר זה.

פרק ראשון – חשיבות הבלתי ניתן לחיזוי

ביוון העתיקה לא הסתכן אף מלך בהרפתקה כלשהי מבלי להיוועץ תחילה במגידי העתידות. אך אצל היוונים יכולת הנבואה לא היתה בהישג ידם של בני תמותה פשוטים. זו היתה שמורה רק לאלים, ולאלים מסוימים בלבד. בן תמותה יכול היה לקבל מאל את יכולת ראיית הנולד באופן יוצא דופן, על ידי ייפוי כוח, כאות תודה על שירותים שנתן לו. זה היה מקרהו של מגיד העתידות הנודע ביותר, טירסיאס, אשר נתפרסם במיוחד בנבאו את גורלם של בעלי שם כגון נרקיס, אדיפוס והרקולס. טירסיאס היה עיוור. יש אומרים כי אתנה היא שעיוורה אותו על שראה אותה בהיסח הדעת עירומה באמבט. אך, נפעמת מקינות אמו של טירסיאס, היא שחררה ממגנה את הנחש אריקטוניוס, וציוותה עליו לטהר בלשונו את אוזניו של טירסיאס, כך שיוכל להבין את לשון הציפורים המנבאות.

לפי אחרים, קיבל טירסיאס מזאוס את מתנת הנבואה על שפתר את אחת הבעיות הקשות ביותר הניצבות בפני יצורי האנוש: לדעת מי מביניהם, האיש או האישה, חש יותר עונג באהבה. בטיילו יום אחד על הר סילן, פגש טירסיאס בשני נחשים מזדווגים. משהופרעו, תקפו אותו הנחשים. טירסיאס השתמש במקלו כדי להתגונן והרג את הנקבה. מיד הפכה אותו אתנה לאישה, והוא נהיה לזונה נודעת. כמה שנים אחר כך, הוא היה באותו מקום ובאותו מצב עם זוג נחשים, ששוב תקפו אותו. אך הפעם הוא הרג במכות מקלו את הזכר, וכך זכה שוב להיות גבר. ימים מספר אחר כך פרצה מריבה משפחתית בין זאוס להֵרה, כשהיא גוערת בו על אין ספור בגידותיו. כדי להתגונן, ענה זאוס כי, בכל מקרה, כאשר היא חולקת אתו את מיטתו, היא הזוכה במיטב. "זה ידוע, כך מלמל, יחסי המין מביאים עונג רב יותר לאישה מאשר לאיש. – כלל וכלל לא, צעקה הרה הזועמת, זה בדיוק להפך, ואתה יודע זאת היטב." על טירסיאס הוטל לשים קץ למריבה באמרו את דעתו על השאלה לפי ניסיונו שלו. "אם באהבה העונג נמדד בעשרה קבים, ענה, הנשים מקבלות

שלוש פעמים שלוש והגברים רק אחד." מוקנטת בגלל החיוך המנצח של זאוס, הפכה הרה את טירסיאס לעיוור. כפיצוי על כך, העניק לו זאוס את הנבואה וחיים שנתמשכו על פני שבעה דורות.

כך פועלים האורקל והנבואה כאמצעי תקשורת בין בני האנוש והאלים, אך הם נשארים תמיד נחלתם של האלים. הדברים לא השתנו כלל מאז. אלא שבעקבות כמה מקרים של שימוש לרעה, האלים מקפידים יותר, והחליטו שלא להעניק שום ייפוי כוח של כשרון הנבואה. שכן אף חוזה, קוסם או מגידת עתידות, לא צפו לא את הצמיחה הכלכלית של יפן, לא את נפילתה של חומת ברלין, לא את התפרקותן של הדמוקרטיות העממיות, לא את מגפת האיידס, לא אף אחד מהאירועים החשובים שהתרחשו בשנים האחרונות.

אם כך איננו יכולים לדעת את מה שמעניין אותנו ביותר בעולם: מה שיתרחש מחר. כי אחת הפעילויות הרווחות ביותר והנחוצות ביותר של יצורי האנוש, היא להביט קדימה. מה שפול ואלרי (Valéry, Paul – **Oeuvres**, Paris, Gallimard, Bibliothèque de la Pleiade, 1962) קרא "לעשות את העתיד". אורגניזם אינו חי אלא במידה שהוא ימשיך לחיות, ולו רק לעוד רגע. אין אף תנועה, אף עמדה, שאינה טומנת בחובה את ה"אחר כך", "לאחר מכן", מעבר לרגע הבא. לנשום, לאכול, לצעוד, זה לצַפות. לראות, פירושו לראות מראש. כל אחת מפעולותינו, כל אחת ממחשבותינו מעסיקה אותנו במה שיהיה. לכל יצור אנוש, העתיד מתמזג עם עצם פעולת החיים.

הדמיון שלנו פורש לפנינו ללא הרף את התמונה המתחדשת תדיר של מה שיכול לקרות, של מה שאפשרי. ואל מול בבואה זו אנו מעמתים בקביעות את חששותינו ואת תקוותינו. אל תצוגה זו של אפשרי עתידי אנו מכוונים את תשוקותינו ואת סלידותינו. האורגניזם שלנו הוא מעין מכונת תחזית, אוסף של מכשירי תחזית אוטומטיים. אך בעוד אשר טִבעֵנו הוא לְצפות בלי הרף אל העתיד, המערכת בנויה כך שתחזיותינו חייבות להיות לא-ודאיות. איננו יכולים לחשוב על עצמנו בלי הרגע הבא, אך איננו יכולים לדעת מה יהיה הרגע הזה. מה שאנו חוזים היום לא יתגשם. בכל מקרה חייבים להתרחש שינויים, אך העתיד יהיה שונה ממה שאנו מאמינים. הכול מכוון כדי שלא נדע את העתיד, אף על פי שהוא המעניין אותנו ביותר. צורך זה לדמיין את העתיד, כמו גם אי האפשרות לדעת אותו, שניהם שזורים בעצם מארג חיינו. הם מהווים יסוד בסיסי, מרכיב של חיים אלה. "איך לחיות בלי הבלתי נודע לפנינו?" שאל רנה שאר (Char, René – "Le Poème pulvérisé", **Oeuvres complètes**, Paris, Gallimard, Bibliothèque de la Pleiade, 1983, p. 247).

האירוע היחיד שכל אחד יכול לצַפות לו בביטחון הוא מותו. אך אם הרעיון עצמו נסבל איכשהו, הרי זה משום שפרט לחריגים, מועדו בלתי צפוי לחלוטין. אי-יכולת-הצפייה באה כאן במקום האלמוות. יונתן סויפט (סוויפט, ג'ונתן – **מסעות גוליבר**, הוצאת שוקן, תל-אביב) מצא מרשם נוסף כדי להפוך את רעיון המוות לנסבל. במסעו אל האי לוגנג (Luggnagg) פוגש גוליבר עם מנומס ונדיב שיש לו ייחוד: מיעוט קטן של האוכלוסייה, הסְטְרוּלבְּרוּגים, הם בני אלמוות. האלמוות אינו זכות יתר של משפחות מסוימות, אלא תוצאה של מקריות. אפשר היה לחשוב שאומה כזאת, שבה כל ילד נולד עם סיכוי להיות בן אלמוות, תהיה מאושרת. אך אין זה כך כלל וכלל. כי עם האלמוות לא קיבלו הסטרולברוגים נעורי נצח. הם מזדקנים. וכמו במקרה המאהב של אורורה, שזאוס העניק לו אלמוות, אך לא נעורי נצח, הסטרולברוגים המזדקנים נעשים מגעילים, בלתי נסבלים ואומללים. יתר האוכלוסייה, כלומר הרוב המכריע, שונאים אותם ובזים להם. בעבורם הופך המוות להיות גאולה מהפורענות הנוראה, שכן כך נראה בעיניהם האלמוות.

מדוע מתרחשים הדברים כך ולא אחרת? מדוע לא ניתן לחזותם, גם אם בדיעבד ניתן

להסבירם? זהו אחד הנושאים שמפתח טולסטוי בחלק האחרון של **מלחמה ושלום**. בשביל טולסטוי אין כל מְתאם בין האירועים לבין רצונם של האנשים. בין השתלשלות הקרבות במהלך מלחמת רוסיה לבין מאמצי המפקדים, נפוליאון וקוטוזוב. הדוגמה הטובה ביותר לחוסר התאמה זה היא קרב בּוֹרוֹדינוֹ. לא לצרפתים ולא לרוסים לא היתה סיבה כלשהי לפתוח בו. תוצאתו היתה בשביל הרוסים צעד נוסף לקראת אובדן מוסקבה, דבר שממנו חששו יותר מכל; בשביל הצרפתים – צעד נוסף לקראת אובדן צבאם, דבר שגם הם חששו ממנו יותר מכל. והרי הרבה לפני התחלת הקרבות לא היה כל ספק בתוצאה זו. אך זה לא מנע את נפוליאון מלהציע את הקרב, ומקוטוזוב מלהסכים לו.

קוטוזוב השתדל במשך זמן רב לצייר בדמיונו את אפשרויות התמרון של נפוליאון. הוא תאר לו את צבאו מרוכז בנקודה מסוימת לצורך הפריצה, או פרוש בכמה חילות לשם כיתור. הוא דמיין, חשב, צפה. אך הדבר היחיד שאותו לא יכול היה לחזות היה בדיוק מה שהתרחש: אותה תנועת הלוך ושוב חסרת הגיון ועוויתית של צבא נפוליאון. "איש לא יכול היה לחזות אז", אומר טולסטוי, "את מה שנראה לנו כיום כה מובן מאליו, את התמוטטותו של צבא בן שמונה מאות אלף חיילים, הטוב בעולם, מונהג בידי גדול המצביאים, אל מול צבא חלש ממנו פי שניים, חסר ניסיון ומונהג בידי גנרלים שכולם חסרי ניסיון." לא רק שאיש לא יכול היה לחזות זאת, אלא בעוד שמצד הרוסים התאמצו כאילו להכעיס לבלום את הצעדים שהיו יכולים להציל את רוסיה, מצד הצרפתים, למרות הניסיון והגאונות הצבאית כביכול של נפוליאון, השתדלו לנסות להגיע למוסקבה לקראת סוף הקיץ, במלים אחרות לעשות בדיוק את מה שיגרום לאובדנם.

וכך, ממשיך טולסטוי, במלחמה מאמינים המפקדים ביכולתם לחזות, להחליט, לפקד, לקבוע את מהלך הדברים. למעשה, הכל תלוי בפעולתו האקראית של מַבָּע כלשהו, או גם בתנועה ספונטנית כלשהי המקימה או מפילה באופן בלתי צפוי צבאות שלמים. "מפקד, מצביא – אומר טולסטוי בקשר לקוטוזוב – מצוי תמיד בלב רצף עולה של נסיבות. האירוע מתגשם ומקבל את משמעותו לאט לאט." וכך, הגנרל הטוב ביותר הוא זה המשאיר לאחרים לעשות ולייעץ במועצות המלחמה וקורא ספר בלשים בערב הקרב. החכם ביותר הוא זה שאינו פועל ונותן לדברים להתרחש. "מדוע אם כן התרחשו הדברים כך ולא אחרת? מסכם טולסטוי. משום שהתרחשו כך."

אין זה בלתי מעניין לציין כי בסוף מאה זו, המאה העשרים, תעשיית העתיד פורחת בחברה המערבית שלנו. בצרפת, כארבעים אלף קוסמים, אִצְטַגנינים, חוזי עתידות וקוראות בקלפים מתחלקים במחזור כספים שנתי של כמה עשרות מיליארדי פרנקים. בערך אחד מכל עשרה צרפתים, כולל מספר ניכר של מנהיגינו הפוליטיים, נראה שמתנהגים כמו אותם מלכים באיליאדה ומתייעצים פחות או יותר בסדירות עם חוזות העתידות החביבות עליהם. אומרים כי אחד הנשיאים האחרונים של ארצות הברית לא קיבל החלטות אלא בעקבות דעתה של אשתו, וזו התייעצה קודם לכן עם מגידת העתידות שלה. ונשיאים צרפתים מסוימים מעדיפים גם הם לדאוג שהכוכבים יהיו לצדם.

כה חזק בדרך כלל האֵמון ביכולת החיזוי של המדע, עד כי אצטגנינים ומגידות עתידות אינם מהססים להגדיר את תחזיותיהם כ"מדעיות" כדי לפתות את הלקוח. ואמון זה אינו נחלתם של חוזי העתידות בלבד. בכל שנה מאורגנים כנסים המתמקדים בנושאים עתידניים כגון: "מה תהיה הביולוגיה בעוד עשרים שנה?" או: "רפואת המאה העשרים-ואחת", או: "מה יהיו השלכות המדע על החברה בראשית המאה הבאה?" אלה הבוחרים נושאים כאלה אוהבים לראות רחוק. הם רוצים לפתוח דרכים נרחבות, לפרוש תשקיפים רחבים שבהם ישתלב באופן טבעי עתיד צייתני. שכן המנהלים והפוליטיקאים של המדע אינם סובלים את הרעיון של מחקר עיוור, המתקדם תוך

גישוש בלי תוצאות מובטחות. כיוון שנתמנו לנהל את המדע, הם חייבים לפחות לכוונו: הם רוצים להשתתף בהרפתקה גדולה זו של האנושות. בעבורם, להכין תכניות, להתוות כיוון, לדבר על העתיד, פירושו כבר לשלוט בו.

אבל הרי המדע גם הוא בלתי ניתן לחיזוי. המחקר הוא תהליך ללא סוף, שלעולם אי אפשר לומר כיצד יתפתח. הבלתי ניתן לחיזוי הוא בעצם טבעו של המפעל המדעי. אם הדבר שיתגלה הוא באמת חדש, כי אז הוא מעצם הגדרתו משהו בלתי נודע מראש. אין כל דרך לומר לאן יוביל שטח מחקר נתון. לכן אין אפשרות לבחור היבטים מסוימים של המדע ולדחות את האחרים. כמו שהדגיש לואיס תומאס (Thomas, Lewis – **The Medusa and the Snail**, New York, the Viking Press, 1979, p. 73), המדע, או שישנו או שאיננו. אם הוא ישנו, אי אפשר לבחור בו רק את מה שאוהבים. יש לקבל בו גם את החלק הבלתי צפוי והמדאיג.

אך לשווא נקווה לחזות את הכיוון שבו יצעד מדע. בכל רגע אפשר, בהתאם לידע שהושג, לדמיין את מה שיתרחש במשך... נאמר חמש השנים הבאות. אך זהו החלק הפחות מעניין של המחקר, הדשדוש היומיומי, השגרה. החלק המעניין באמת הוא זה שלא ניתן לחזותו. הדבר שמישהו בלתי ידוע, במרתף או בעליית גג, יחשוף לפתע, יטפל בו יום אחד במבט חדש, ובכך יתרום הארה חדשה על עולמנו או על קטע קטן בתוכו. אפשר אפילו לומר כי במחקר בסיסי, אם אין בהתחלה מנה ראויה של אי-ודאות לגבי תוצאות הניסוי, אין כל סיכוי שמדובר בשאלה חשובה. לרוב מתחילים עם נתונים קצת דו-משמעיים ולא שלמים. הבעיה היא למצוא קשרים בין רסיסי מידע שלכאורה אין קשר ביניהם. תכניות הניסוי נקבעות תוך גישוש, בהתבסס על סבירויות. תוצאות ניסוי המתרחש כצפוי הן לעתים מעניינות. אך בדרך כלל רב ערכן יותר אם יש בהן הפתעה. בעצם, אפשר כמעט למדוד את חשיבות העבודה המדעית לפי מידת העוצמה של ההפתעה שהיא מעוררת.

היבט בלתי ניתן לחיזוי זה מופיע לכל אורך תולדות המדעים. מי היה אומר ב-1850, לפני פסטר וקוך (Koch), כי המחלות הזיהומיות תתגלינה כתוצאה של פלישת חיידקים מסוימים? או ב-1950, לפני עבודתם של ווטסון וקריק, כי הכימיה של התורשה תובן לפני זו של הגידים. וכל זה נכון לא רק לגבי המחקר הבסיסי, אלא גם לגבי יישומיו. אילו רצו בתקופת האבן לפתח כלי כדי לחתוך ולקצץ, היו מייצרים גרזני אבן, בכל הצורות והמחירים, אך לעולם לא היה מתגלה הארד! או אילו היו רוצים בסוף המאה ה-19 לשפר את שיטות איתור הקליעים, היו מייצרים מַחדרים בכל צורה וגודל מחומרים שונים, אך לעולם לא היו צופים את מציאותם של קרני רנטגן ואת השימוש בהן.

כפי שנאמר לעיל, יש סוג של אזרחים שבעיניהם כלל לא מוצא חן האופי הבלתי ניתן לחיזוי של המחקר המדעי. אלה הפוליטיקאים והמנהלנים של המדע. הללו אינם אוהבים את המחקרים שעליהם נאמר להם כי אי אפשר לחזות לאן יובילו. מכאן נטייתם לתכניות נרחבות שמטרתן – ה״תכליתיות״, כמו שאומרים היום – ברורה היטב: הגֵנוֹם האנושי, הסרטן, האיידס וכו׳. כל אלה תחומים שבשבילם מעריכים המנהלנים שיש ביכולתם לקבוע תכניות ולוחות זמנים למחקר.

אך מֵיזָמים כאלה אינם יכולים להצליח אלא בהיותם מושתתים על מחקר שכבר הוכן כהלכה, על שיטות מדעיות מבוססות היטב, שימשיכו בתנופתן תוך הפעלת רעיונות, שיטות וטכניקות שכבר הוכיחו את עצמן. לעומת זאת, המחקר בתחומים בלתי ידועים לחלוטין, אלה המדעים המצויים בחיתוליהם, המהססים, המתלבטים, שבהם הבעיות עדיין פחות מוגדרות והנתונים לא ברורים, מחקר כזה לא ניתן להכלילו בתכניות מוגדרות כהלכה. אין כל סיכוי למצוא פתרונות לשאלות שעדיין אינן מנוסחות כמו שצריך. כאן יש למחקר מראה פרוע, קופצני, כמעט פראי,

שלציבור קשה לתפוס אותו. כיצד לקבוע תכניות ארוכות טווח בתקופה כה סוערת? איך לשער את שלביה של התפתחות בלתי ניתנת לחיזוי לחלוטין?

מה שיכול לעשות, מה שחייב לעשות הפוליטיקאי, הוא לקבוע את חשיבות המדע לאומה, כלומר להגדיר את חלק התקציב שיוקדש לו. מה שיכול לעשות, מה שחייב לעשות המנהלן, הוא לקבוע את חשיבותם היחסית של שטחים שונים במדע, כלומר להגדיר את חלקם בתקציב המחקר. שני תפקידים שהומחשו היטב בגישתו של הגנרל דה-גול, כאשר חזר לשלטון ב-1958. מצד אחד, הוא הכיר בחשיבות המחקר המדעי בהקימו את הוועדה למחקר, שהוענק לה תקציב מוגדל ורב-שנתי. מצד שני, הוא הוכיח יכולת חיזוי בלתי רגילה, כפי שדיווח ריימונד לטרז'ה (Latarjet, Raymond – **In Laboratoire Raymond Latarjet**, Paris, Institut Curie, 1992) בסיפור המעשה הבא. דה-גול מינה ועדה של שנים-עשר "חכמים", שייצגו כל אחד שטח מדעי אחר, כדי שייעצו לו. מקץ שנה הוא החליט לבחור בכמה נושאי מחקר אשר יקבלו תקצוב מיוחד בגלל העניין המיוחד בהם. לשם כך הוא זימן את תריסר ה"חכמים". הוא כינס אותם מסביב לשולחן וביקש כל אחד מהם להציג במשך חמש דקות את נושא המחקר שנראה לו ראוי לתקצוב. וכך נעשה. לטרז'ה הציע ביולוגיה מולקולרית. לאחר שעה השתררה דממה. דה-גול פתח בדברו: "ניתן היה לשער כי גנרל יהיה פתוח במיוחד לתכניות מרהיבות שהוא מבין את מונחיהן, שהוא שותף לנקודות ראותן, שהוא מטבעו צופה את התפתחויותיהן, תוצאותיהן, השלכותיהן, כגון – מאלה ששמעתי זה עתה – המרת האנרגיות, כיבוש החלל, ניצול האוקיינוסים. אך בתוך תוכי, אני שואל את עצמי אם הביולוגיה המולקולרית המסתורית הזו – שבה איני מבין דבר, ויתר על כן, לא אבין דבר לעולם – איננה מבטיחה בטווח הבינוני יותר התפתחויות, בלתי ניתנות לחיזוי, עשירות, אשר יקדמו מאוד את הבנתנו את התופעות הבסיסיות של החיים ואת האי-סדרים שלהם, ואפשר שיכוננו רפואה חדשה שאין לנו כל מושג עליה כיום, שתוכל להיות הרפואה של המאה העשרים ואחת." והביולוגיה המולקולרית נבחרה במקום ראשון על ידי הוועדה. איזו תחזית מפתיעה של העתיד! מפתיעה כמו זו של יוני 1940 בקשר להתפתחות המלחמה! (בחודש יוני 1940 דה-גול התנגד לשביתת הנשק הצרפתית-גרמנית וברח ללונדון, ומשם ארגן את הכוחות של "צרפת החופשית").

סיפור זה מראה כיצד פוליטיקאי יחיד במינו יכול להבחין בחשיבותו של שטח חדש ולהקצות לו את האמצעים להתפתחותו. אך עצם לידתה של הביולוגיה המולקולרית ממחישה היטב את אי האפשרות לארגן את המחקר בשטח חדש, "לתכנן" אותו, כפי שאומרים. הביולוגיה המולקולרית חותרת להסביר את התכונות המדהימות של היצורים החיים – אותן תכונות אשר עד לאחרונה נראה היה שנדרש להן הסבר באמצעות "כוח חיוני" (force vitale) כלשהו – כתולדה של המבנה ופעולות הגומלין של המולקולות המרכיבות את האורגניזם. ביולוגיה זו נולדה מהחלטות אישיות שלקחו על עצמם קבוצה קטנה של אנשי מדע בין סוף שנות השלושים ותחילת שנות החמישים של המאה העשרים. חוקרים אלה באו מתחומים מאוד מגוונים: ביולוגיה, פיזיקה, רפואה, מיקרוביולוגיה, כימיה, קריסטלוגרפיה וכו'. בהבינם כי בלב המחקר של עולם החי מצויות השאלות שהועלו על ידי הגנטיקה, הם יסדו ביולוגיה חדשה. איש לא דחף אותם בכיוון זה. שום מנהלן, שום קרן, אף שר מדע לא גייס אותם לדרך זו. להפך, הסקרנות של כל אחד מהם, דרך חדשה לבחינת הבעיות הישנות, הן שהובילו גברים ונשים אלה לפתור את בעיית התורשה. תולדות הביולוגיה המולקולרית יכולות לשמש דוגמה כדי להבין כיצד נוצר מחקר מקורי, ללא תלות ביישומים אפשריים. הללו לא באו אלא באופן משני, עם האפשרות לפעול על הגנים עצמם של האורגניזמים, מה שנקרא הנדסה גנטית.

גם כאן, לידתה של ההנדסה הגנטית, עצם התנאים של אפשרותה באו בצורה לא ניתנת לחיזוי לחלוטין. במשך שנות החמישים, החוקרים שעבדו על הנגיף התוקף את החיידקים (בקטריופאג' – Bacteriophage) חשפו תופעה מוזרה. נגיף מסוים היה מסוגל להתרבות בשתי תרביות של חיידקים, A ו-B, כאשר הוא הוכן על התרבית A. לעומת זאת, כאשר הוכן על התרבית B, הוא היה מסוגל להתרבות על התרבית B, אך לא על התרבית A. לאחר שנתחוורה המוזרות של המצב, רוב החוקרים לא גילו עוד עניין בכך, מלבד שני ביולוגים שוויצריים, ז'אן וייגלה (Jean Weiglé) וורנר ארבר (Werner Arber). הראשון מת זמן מה לאחר שגילה את התופעה. השני המשיך במחקר בתוך אווירה של אדישות כמעט כללית, בעיקר של הוועדות והארגונים שתפקידם לחלק את תקציבי המחקר. בהיותו עקשן, המשיך ארבר בעבודתו. תוך כמה שנים יכול היה להוכיח כי מקור התופעה בנוכחותם – על תרביות חיידקים מסוימות – של אנזימים שתפקידם לסלק את הדנ"א הזר ובכך למנוע אותו מלחדור אל החיידק ומלהתיישב בו. כל אחד מאנזימים אלה, הייחודיים ביותר, מבחין ברצף קצר מסוים של דנ"א. הם מהווים ממש מעין מספריים גנטיים. הם אלה שאפשרו לפלח מולקולה של דנ"א בנקודות מוגדרות כדי ללמוד אותה לפרטיה. מי היה משער כי לימוד התופעה שגילו וייגלה וארבר יוביל אל ההתפתחות המפתיעה של ההנדסה הגנטית?

קורה גם שתחזיות מסוימות, שניתן היה לחזותן ברגע מסוים, מתגלות כמופרכות על ידי התפתחות חדשה של המחקר. זה המקרה, למשל, במה שהיה קרוי השיבוט (cloning) של יצורי אנוש. במיקרו-אורגניזמים מכנים בשם "שבט" (clone) את מכלול הפרטים הזהים גנטית שמקורם באורגניזם יחיד באמצעות חלוקה, כלומר בהתרבות אל-מינית. ואילו ביחס ליצורים המורכבים, המתרבים ברבייה מינית, נשאלה מזה זמן השאלה בדבר חלקם ומקומם של גרעין התא ושל הציטוֹפְּלַסמה בתופעות ההתמיינות של התאים. במיוחד נשאלה השאלה האם הגרעין, אשר בתוך הביצית מסוגל ליצור את כל סוגי הרקמות, מאבד יכולות מסוימות לאחר ההתמיינות. כדי לענות על שאלה זו בוצעו ניסויים של "השתלה גרעינית": מחליפים את הגרעין של תא ביצית בגרעין שמקורו בתא שעבר התמיינות, של מעי, כליה וכו'. אצל הצפרדע, נוכחו לדעת כי שחזור זה אֶפשר, במקרים מסוימים, ייצורם של ראשנים, ואפילו של צפרדעים בוגרות. מכאן הרעיון כי אפשר יהיה, מִתָּאים של בריז'יט ברדו או של הגנרל דה-גול, לייצר בריז'יטות ברדו או גנרלים דה-גול ככל שרק נרצה. לפני כעשר או חמש-עשרה שנים הופיעו הרבה מאוד מאמרים שתיארו את היתרונות, או לעתים יותר קרובות את התוצאות הנוראות, של שיבוט כזה. במלים אחרות, מה שהשכילו בקושי רב להשיג אצל הצפרדעים, רבים לא היססו להחיל על בני האנוש. אך הניסיונות שנעשו מזה חמש-עשרה שנים הראו כי סוג זה של פעולות לא תמיד מצליח, כי אינו יכול להיות מיושם על כל האורגניזמים, ובמיוחד לא על היונקים. רבים ניסו אצל העכבר, אך איש לא הצליח עדיין להשיג שיבוט. מרגע שהביצית המופרית התחלקה פעמיים, כשהעובר מכיל ארבעה תאים, הגרעין של תאים אלה אינו יכול להבטיח עוד את ההתפתחות של עובר. יתר על כן, גרעיני התאים של מבוגר אינם מסוגלים לכך. אצל הכבשה, לעומת זאת, בישרו חוקרים סקוטים על לידתן של טליות שנוצרו על ידי החדרת גרעין תא של עטין כבשה אל ביצית שגרעינה הוצא. אין מבינים עדיין מדוע מה שיכולה הכבשה אין העכבר יכול כעת. אי אפשר לומר אם נגיע ליצור לפי רצוננו אלברט איינשטיין או אווה גרדנר. בנושא זה יכול כל אחד להמשיך לשקוע בהזיותיו שלו.

אם קשה לִצפות את העתיד, לעתים קשה באותה מידה לשחזר את העבר. לשאלה הנושנה: מאין אנו באים? המחשבה המדעית בה בעת גם חידדה וגם סיבכה את תשובתה. כל היקום והעצמים שהוא נושא עליו, חיים או לא, נחשבים כתוצרים של תהליכי התפתחות שבהם מעורבים

שני סוגי גורמים: מצד אחד, האילוצים הקובעים את חוקי המשחק ומציינים את גבולות האפשרי. מצד שני, הנסיבות הקובעות את מהלך האירועים האמיתי, הסיפור המספר את העלילה כפי שאכן התרחשה. לאילוצים ניתן לרוב לתת ביטוי בדרך של הַצְרָנָה (פורמליזציה); כל הקשור בכך עשוי על כן להיות צפוי במידת סבירות רבה. החלק ההיסטורי, לעומת זאת, יכול להיות מוכר, לעתים מוסבר. אך מובן מאליו, איננו יכולים לחזות את המשך האירועים שמחר יעשו היסטוריה. היבט זה של הכוחות המעצבים את עולמנו הוא אקראי לחלוטין.

החלק היחסי של האילוצים ושל ההיסטוריה משתנה לפי התחום הנדון. ההיסטוריה נפקדה במשך זמן רב מן העולם החומרי. אף אחת מן המשוואות של הפיזיקה הקלאסית אינה כוללת את ממד הזמן. ביקום בלתי משתנה, שבו לא הובחן כלל בין עבר לבין עתיד, הזמן היה הפיך. רק בראשית המאה העשרים חדר הזמן אל הפיזיקה. עם הקוסמולוגיה החדשה, היקום, הגלקסיות, הכוכבים, היסודות, החלקיקים – כל אחד מאלה קיבל היסטוריה.

ממש קשה למצוא סופרים שדמיונם משיג את זה של הפיזיקאים, כאשר אלה מספרים את תולדות היקום. באמצעות החישוב הם מצליחים להעלות מציאות שהראיות המתמטיות לקיומה מנוגדות לכל נתוני התפיסה החושית. לידתו של היקום שלנו, לפני שנים-עשר עד חמישה-עשר מיליארדי שנים, נחשבת כתוצאת תנודות אנרגיה בִּריק הראשוני, שיצרו רִיק ייחודי, רֵיק מחומר אך מלא אנרגיה. מצב זה הוביל לדעתם אל התפשטות אלימה, התפוצצות שאינה אלא המפץ הגדול. תנודות אנרגיה כאלה נדירות מאוד, אך אין להוציא מכלל אפשרות שאירועים דומים התרחשו באזורים אחרים של החלל, בזמן אחר, וגרמו ליצירתם של עולמות אחרים. לפי תיאוריות אלה, עולמנו אינו היחיד. הוא אינו המרכז והבמה לכל המתרחש ביקום. תחילתו אולי אינה ההתחלה של הכול.

הפיזיקאים מספרים לנו כי אלפית המיליארדית של שנייה לאחר המפץ הגדול, כאשר דרגת החום של היקום "נפלה" למיליון מיליארדי מעלות, חלקיקים ואנטי-חלקיקים נוצרו ונתכַּלוּ במהירות הבזק. אחר כך, עם התפשטות היקום והתקררותו, היצירה האטה את מהלכה יותר מאשר ההִתכַּלוּת. כמעט כל החלקיקים נעלמו. ואילו לא היה עודף פעוט של אלקטרונים לעומת אנטי-אלקטרונים ושל קווארקים לעומת אנטי-קווארקים, היו היום החלקיקים הרגילים, אלה שביסוד החומר עצמו, נעדרים מן היקום. מוֹתר פעוט זה של חומר לעומת האנטי-חומר – מותר המוערך בעשירית המיליארדית – שרד כדי ליצור, שלוש דקות אחר כך, את הגרעינים האטומיים הקלים; ואחר כך, לאחר מיליון שנה, את האטומים; ומאוחר יותר, את היסודות הכבדים בכוכבים; ולבסוף, את החומרים שמהם נוצר עולם החי. אלמלא היתה נמצאת אותה עשירית מיליארדית של החלקיקים העודפים לעומת החלקיקים האחרים, היקום שלנו לא היה קיים, או, על כל פנים, לא היה קיים בצורה המוכרת לנו.

אשר לכדור הארץ, הרכבו נחשב כתוצר לוואי של התגבשות האנרגיה בכוכבים ושל הגלים הרצופים של לידה והיעלמות של כוכבים בגלקסיה שלנו. מעריכים היום כי לפני ארבעה וחצי מיליארדי שנים נוצר כדור הארץ על ידי הצטברות: האבק הקוסמי הצטבר לגרגירים, הגרגירים לגושישים, שנהפכו לחלוקי אבן ואחר כך לאבנים גדולות, לגרמי שמים קטנים, ולבסוף האבק הגיע לגודלו של הירח, ואחר של כדור הארץ. תסריט מדהים. כדור הארץ הזה אשר עליו אנו נעים, הנושא עליו את האוקיינוסים את היבשות, את ההרים, שעליו חיים ריבואות על ריבואות של יצורים חיים, כדור הארץ הזה נתגבש מהצטברותם ההדרגתית של חלקיקי אבק שבאו מן השמים! ומה לומר על התנאים הנחוצים לחיים שאינם קיימים על כוכבי לכת אחרים כגון מאדים ונוגה: המים, המרחק מן השמש, המאפשר לכדורנו להיות לא חם מדי ולא קר מדי, וכו׳. כמה אלפי

אירועים, בלתי תלויים לחלוטין, שכל אחד מהם היה עשוי לא להתקיים, היו חייבים להתרחש בסדר מסוים כדי שייווצרו היקום, הגלקסיה שלנו, מערכת השמש שלנו וכדור הארץ? לגבי כל החלק הזה של ההיסטוריה, המדע יכול בדיעבד להסביר כיצד אירוע כזה התרחש. בשום מקרה הוא לא יכול לחזותו.

הביולוגים, מצדם, חייבים להפעיל את כל עתודות דמיונם בבואם לתאר את מקור החיים. ברור בהחלט כי בעולם החי ובהתפתחותו, חלקה של ההיסטוריה הוא חשוב ביותר. נראה שהחיים הופיעו די מהר, קרוב לוודאי פחות ממיליארד שנים לאחר היווצרות כדור הארץ, בצורה שניתן לכנותה קדם-חיידק. האומר חיים אומר הִתרבות. אך מנגנון ההתרבות כפי שהוא נראה כיום אצל האורגניזם הפשוט ביותר, אצל החיידק הצנוע ביותר, מתגלה מיד כבעל מורכבות מפחידה. כי עצם ההכפלה של ה-DNA מפעילה מספר רב של חלבונים שהסינתזה של כל אחד מהם דורשת מספר ומגוון רב עוד יותר של מַקרו-מולקולות. יש אפוא להוציא מכלל אפשרות שמערכת כזו תצא, כולה מצוידת, מירֵכו של יופיטר: מכאן הצורך לדמיין תסריטים פחות או יותר סבירים שלפיהם יכלה להיבנות בהדרגה מורכבות שכזו. לפי התסריט שבאופנה מזה כמה שנים, לעולם החי כפי שאנו מכירים אותו, ובו שולט הדנ״א, קדם עולם שבו ה-RNA תפקד גם בתהליך השכפול וגם כקטליזטור. למותר לומר כי הופעתו של עולם זה של רנ״א והמעבר אל עולם של דנ״א מצריך מספר ניכר של שלבים, שכל אחד מהם סביר פחות מקודמו. חוץ מזה, רוב ההנחות הנדרשות לתסריטים כאלה אינן ניתנות לשחזור ולא לאימות ניסויי. במלים אחרות, אם ברור כי בני אנוש, בעלי חיים, צמחים, פטריות, חיידקים, בקיצור – כולנו היצורים החיים, כולנו צאצאים של איזה קדם-חיידק ראשוני, כי אז אין אנו קרובים להכיר את הפרצוף האמיתי שהיה לאבינו המשותף.

וכך, בדיוק כשם שהאבולוציה שינתה את נקודת המבט על החיים בעולם, הקוסמוגוניה [תורת היווצרות העולם] המודרנית החליפה את הרעיון של יקום בלתי משתנה, שזמנו הפיך, ברעיון של יקום המצוי בשינוי תמידי וכפוף למהלך ההיסטוריה. היקום, כמו החיים, יש לו ראשית. כמוהם, יש לו התהוות. אך חושינו ומוחנו נועדו לא כדי להבין את תכונות האלקטרון, או את המרחקים המפרידים בין הגלקסיות, ולא את העידנים הקוסמולוגיים, אלא כדי להתייחס אל העולם הסובב אותנו, כלומר עולם של עצמים, מרחבים וזמנים בקנה מידה של היצור האנושי. כדי לדמיין את מה שהיה קודם או מה שיהיה אחר כך, עלינו להתחכם עם עצמנו. ואין זה בטוח כי נגיע אי פעם לשחזור של מה שבאמת התרחש. כפי שהדגיש זאת קלוד לוי-שטראוס (Lévi-Strauss, Claude – **Histoire de Lynx**, Paris, Plon, 1991, p. 11-12), בסיפוק ללא ספק, הסיפורים שהמדע בא לספר לנו מרוחקים מן השכל הישר כמו שמרוחקים ממנו הסיפורים שיצרה המחשבה המיתית. כאשר דנים במוצא החיים, יש להניח כי במשך שמונה או תשעה מיליון שנים התרחשו בזה אחר זה אלפי אירועים, כל אחד מהם בהחלט בלתי סביר, כדי לאפשר מעבר מארץ ללא חיים אל החיים בעולם של רנ״א, ואחר כך אל עולם של דנ״א. ברור כי היסטוריה כזו נראית להדיוטות קשה לתפיסה כמו הבריאה בסיפורי התיאוגוניה של הסיודוס, האוּפַּנִישאד או התנ״ך. לאמיתו של דבר, הסיפורים המיתיים נדמים קרובים יותר אל השכל הישר מאשר הדיבורים של הביוכימאים או חוקרי הביולוגיה המולקולרית.

באשר לאלה האחרונים, בהיותם ניצבים בפני הקשיים של בעיה, אשר יש חשש כי לא יימצא לה פתרון במשך זמן רב, הם פונים אל שלושה פתרונות אפשריים. אחדים, וביניהם מן הביולוגים הגדולים ביותר, חושבים את הופעת החיים על הארץ כה בלתי סבירה עד שהם מעדיפים, חצי בצחוק וחצי ברצינות, להעלות לדיון מעין פַּנסְפֶּרמְיָה (Panspermie): זרעי חיים הגיעו אל הארץ

על רכב חלל שנשלח מכוכב רחוק על ידי ציוויליזציה מפותחת יותר משלנו! מה שכמובן אינו אלא מסיג את הבעיה קמעא לאחור. זו האפשרות היותר נדירה.

אחרים חושבים כי הופעת החיים על הארץ היתה כה בלתי סבירה עד כי ללא ספק התרחשה רק פעם אחת בלבד. היא תוצאה של רצף אירועים שכל אחד מהם יכול היה שלא להתרחש, כך שאפשר אפילו שלא היו נוצרים לעולם חיים על פני הארץ. אותם מדענים עצמם נוטים גם להאמין כי אין כנראה חיים אחרים עם תודעה ביקום.

ולבסוף, קטגוריה שלישית של מדענים מגלה גישה שונה לחלוטין. הם חושבים כי כל שלבי היווצרותו של עולם הרנ״א והמעבר אל עולם הדנ״א אינם אלא ריאקציות כימיות רגילות. השלבים הללו אינם יכולים על כן שלא להתרחש, אם יינתנו להם מספיק הזדמנויות, כלומר די זמן. בשבילם, החיים לא יכלו אפוא שלא להיווצר על פני כדור הארץ. בנוסף לכך, הואיל והם רגישים לטענת האַסטרוֹפיזיקאים, שבשבילם היקום כולל מספר רב של פלנטות, שתכונותיהן חייבות להיות דומות לאלה של כדור הארץ, הם חושבים שחייב להיות ביקום מספר רב של מוקדי חיים ואפילו סביר שיהיו חיים מודעים.

במצב הנוכחי של הידע, הבחירה בין שתי האפשרויות האחרונות הללו היא קודם כל שאלה של טעם. יש המעדיפים לטפח את תזת החריגוּת, כלומר החיים מוגבלים לכדור הארץ, וכתוצאה מכך, ההכרה האנושית שרק היא מהרהרת ביקום ובמה שמאכלס אותו. האחרים, לעומת זאת, מעדיפים להאמין בבַּנָליוּת החיים, שאפיוניהם על פלנטות אחרות, לפי דעתם, אינם יכולים להיות שונים מאוד מאלה שנצפו על פני כדור הארץ. מצד שני הם משוכנעים כי החיים, כיוון שהחלו, חייבים בהכרח להוביל למודעות, ולכן הם משתדלים למצוא אמצעים לתקשר עם ציוויליזציות אחרות, אשר חייבות, לדעתם, לאכלס אזורים אחרים של היקום.

אלא שלפחות עד עתה לא נתקבל שום קורטוב של אות מן הגלקסיה שלנו או מחוצה לה. לאחרונה הוסבה תשומת הלב אל מטאוריט אשר **עשוי היה** לבוא מכוכב הלכת מאדים, **העשוי** לכלול מבנה המזכיר את זה של המבנים החיים העתיקים ביותר שנמצאו על פני הארץ. אך הנימוקים המועלים בענין זה כלל אינם משכנעים. העניין נראה בעיקר קשור לפרסומת של סוכנות החלל האמריקנית (NASA) לקראת טיסותיה העתידיות בחלל אל המאדים. כל מה שלומדים מהאורגניזמים המגוונים ביותר החיים על הארץ שלנו מראה כי, ככל שהדעת נותנת, הם כולם צאצאים של אב קדמון אחד ויחיד. נראה אם כן כי החיים לא הופיעו אלא פעם אחת ויחידה על פני כדור הארץ שלנו; שהם תוצאה של סדרת אירועים, שיש אי-סבירות גבוהה לגבי כל אחד מהם; כי אילו כמה מאירועים אלה לא היו מתרחשים, החיים כפי שאנו מכירים אותם לא היו קיימים.

בלכתי בבוקר למכון פסטר, אני חוצה את גן לוקסמבורג. בכל שנה, ביום אביב, בהיכנסי אל הגן, אני חש את אותו הלם, את אותה השתאות. בכל שנה, אותה פליאה למראה הניצנים הבוקעים ומתחילים ללבלב; למראה הנצת העלים, תחרה ירוקה זו המעטרת את הענפים ורוטטת ברוח, כאילו פוחדת להיכשל. אך המדהים הוא שלעולם אין היא נכשלת. משום שהמערכת שוב עובדת. שוב עומדים הימים להתארך, האור והחום עומדים לשוב, העלים ייווצרו, ואחר כך הפרחים והזרעים. חיות וצמחים יתפקעו מחיות ומגידול. אף לא תקלה קלה, אף לא מעידה. התכנית איתנה ומתמידה. אדישה לעסקיהם של בני האדם, המכונה הגדולה של היקום ממשיכה באופן בלתי נמנע לפעול, ללא דופי, מושלמת. יותר מן האוקיינוס וסערותיו, מן ההר וקרחוניו, מכיפת השמים והגלקסיות שלה, שובו של רטט ירוק זה העובר בעצים ומפתיע בבוקר אחד של אביב,

מעניק לי, בכוחו של המובן מאליו, את הרושם כי אני ניצב אל נוכח חזיון אדיר, אשר מזה כתריסר מיליארדי שנים מניע את הבמה הגדולה של היקום.

הפיזיקאים מסוגלים להסביר כיצד נתהווה החומר וכיצד פועלים הכוחות המסדירים אותו. אך לא ברור לי עדיין אם הם יכולים לצייר במחשבתם טבע המחונן בסגולות אחרות; אם, בשלל האילוצים והתולדות שעיצבו את היקום, רק ההיסטוריה תורמת יסוד של אקראיות. או האם, במקור, האילוצים הללו – מה שקרוי חוקי הטבע –יכלו גם הם להיות תוצאה של אקראיות.

בהיותי ילד, האמנתי ללא ערעור בסיפורי פֵיות. בשבילי הם תיארו היבט מסוים של העולם, מציאותי לא פחות מן המראות שראיתי ברחוב או בכפר. המפלצות והענקים, שכל אחד ידע כי הם טורפים את הילדים הקטנים, לא נראו לי כלל שונים מאנשים מסוימים שבהם נתקלתי בגנים ומהם אמרו לי להיזהר. הדלעת של סינדרלה ההופכת למרכבה לא נראתה לי יותר יוצאת דופן מאשר תעלולי הקלפים שהיה מבצע אבי כאשר היה במצב רוח טוב. שום דבר מכל אלה לא הציב בפניי שאלות. העולם היה כזה. כך היו פני הדברים.

זו שוב אותה התרשמות שאוחזת בי בכל אביב אל מול התחדשות העלים. עם הזמן השתנו כמה מאמונותיי. האמון שלי ביכולתן של הפיות או בכוחן של המפלצות התרופף במקצת. אך לנוכח מקלעות העלים החוזרות ומופיעות בנאמנות בכל שנה, אני מרגיש בחזקה את שרירותו של העולם המקיף אותנו. במלים אחרות, אם ברצף האירועים שהתרחשו כדי להוליד את היסודות, את הגלקסיות, את הכוכבים, את הארץ, כמה מהם לא היו מתרחשים, או שלא היו מתרחשים ברגע הנכון, אפשר היה שלא יהיו עלים על העצים, אולי לא היו עצים כלל, אולי לא היה כלל עולם חי. כיצד לא לראות את השרירותי, את הפנטסטי אפילו, בעולמנו ובתפקודו? כך הם פני הדברים. בעיקר בעולם החי. כיצד לא נופתע ממוזרויות מסוימות, כגון המוות וההזדקנות? איזה צורך יש בעובדה שהעצים נושאים עליהם עלים, שאצל רבים מהם נושרים בכל סתיו כדי לצמוח שוב באביב? או כי לחַיות יש ארבע רגליים? או כי היצורים החיים צריכים להתרבות? או אפילו שאצל רובם חייבים להיות שניים כדי לייצר שלישי? שמכל תפקודי הגוף רק הרבייה מובטחת באמצעות איבר שכל פרט מחזיק אך ורק במחציתו, מה שמכריח אותו להקדיש הרבה זמן ואנרגיה בחיפוש אחר מחציתו השנייה? אך כך הם פני הדברים. אין כל טעם אפוא לשאול אם עולמנו היה עשוי להיות שונה מאוד, או אפילו אם עלול היה שלא להתקיים כלל. בשביל המדען, עולם זה הוא ערך ייחודי: הוא קיים והוא מתפקד מזה כעשרה או שנים-עשר מיליארדי שנים.

בסרטו של רנה קלר **זה קרה מחר**, מתוודע עיתונאי צעיר אל רוח רפאים המטה לו חסד. היא שולחת לו בכל יום את העיתון של מחר. מכאן יש לכְּתָּב כוח יחיד במינו. הוא יודע מה יקרה המחר. הוא מכיר את המאורעות, את הסכנות, את התוכניות; את תוצאות המרוצים, את תנודות הבורסה; בקיצור, הוא מצליח בכל מפעלותיו, לרבות באהבה. עד לאותו יום שבו מבשר לו העיתון את מותו שלו למחרת היום. מבוהל, העיתונאי בורח כדי להימנע מגורלו. אך יעשה מה שיעשה, הוא לא יוכל לחמוק. הוא מוצא את עצמו בשעה ובמקום הצפויים למותו. ואם, למרות הכל, הסרט מסתיים טוב, הרי זה רק משום שלעתים יש בעיתונים ידיעות כוזבות!

פרק שני – הזבוב

בלי הזבובים אין מחבט זבובים, בלי מחבט זבובים אין מושל באלג׳יר, אין קונסול [...] אין עלבון לנקום אותו, אין עצי זית, אין אלג׳יריה, אין שרב, רבותיי, והחום הגדול הוא בריאותם של הנוסעים [...]

ז׳אק פרבר, **מלים**

בְּרְנוֹ, שבעה באוגוסט 1965. המון מתקהל מסביב לקתדרלה, נדחק לפני השערים שעליהם שומרת המשטרה ללא עדינות יתרה. בפעם הראשונה מזה עשרים שנה תתקיים מיסה. אך למרות צימאונה לדת, לאוכלוסיית העיר אין גישה. טקס זה מאורגן על ידי האקדמיה למדעים של הרפובליקה הדמוקרטית של צ׳כוסלובקיה לרגל הזדמנות יוצאת דופן: יובל המאה לחיבור הראשון של הכומר גרגור מנדל על התורשה של האפונה. הכוונה היא כאן לחוג בעת ובעונה אחת את זכר אחד מגדולי המדענים הצ׳כים וגם את מה שמקובל לחשוב כעל אירוע הלידה של הגנטיקה.

האקדמיה הצ׳כית הזמינה גנטיקאים מכל רחבי תבל לכנס שבו יידונו גם תפקידו של מנדל וגם ההתפתחויות שידעה הגנטיקה במחצית הראשונה של המאה העשרים. כיוון שמנדל היה איש הכנסייה, כיוון שהוא עצמו נהג לערוך את המיסה במקום זה, החליטה האקדמיה הצ׳כית, לאחר היסוסים רבים, לנעול את הכנס במיסה גדולה לזכרו של גיבורה – מיסה השמורה אך ורק למשתתפי הכנס. מכאן מראה לא רגיל באולם הכנסייה. מצד אחד, כמאה גנטיקאים אמריקניים רווים נחת מההזדמנות, אך נדהמים למצוא את עצמם כך בארץ קומוניסטית. מצד שני, כמאה גנטיקאים סובייטיים, בהבעה אטומה, בחיבוק ידיים, המומים להימצא במיסה. מפוזרים בכל מקום, כמאה גנטיקאים אירופיים וצ׳כים נבוכים בגלל מצבם בין הגוש האמריקני לגוש הסובייטי. וכל ההמון הזה קם על רגליו כאיש אחד כאשר מתחת לקמרון מריעות החצוצרות, המלוות קנטטה של באך, וההגמון של ברנו ופמלייתו צועדים לאט קדימה.

אכן, הגיע האביב של פראג!

במשך כל המאה העשרים מצאה את עצמה הגנטיקה מעורבת בפוליטיקה. בכל ארץ שהיא, כנס לציון יובל המאה למדע זה ולמייסדו היה נחשב לאות הוקרה מובן מאליו. אך באותה תקופה, ובדמוקרטיה עממית, זה היה שונה. כנס כזה יכול היה להתקיים רק לאחר שהגנטיקה זכתה לטיהור שמה ומתנגדיה הראשיים נוטרלו. כי כשם שהכנסייה הוקיעה בעבר את רעיונותיו של גליליי כסותרים את הדוקטרינה, כך הקומוניסטים אסרו את הגנטיקה, שנחשבה כסותרת את עקרונות המרקסיזם.

חרם זה החל בסוף שנות העשרים. בשם הדיאלקטיקה, הניאו-למרקיאנים הקומוניסטים, שהחזיקו בתיאוריה של הורשת תכונות נרכשות (התיאוריה של הזואולוג הצרפתי Jean Baptiste Lamarck), תקפו את הגנטיקאים הרוסים, כשהם מצוידים לא בנימוקים מדעיים, אלא בטקסטים של אנגֶלס. גיבורה של פרשה זו היה מהנדס אגרונום, טרופים ליסנקו (Trofim Lyssenko). בראשית שנות השלושים נודע הלה באופי הסנסציוני שהצליח לשוות למה שקרא ״התגלית״ שלו, כלומר דרכי פעולה מסוימות שאפשרו לקבל בחורף יבולים של חיטה שנזרעה בקיץ. בדרכים אלה לא היה שום דבר מקורי והם נזנחו עד מהרה. אך מכוחן של תוצאות אלה, שהוא חשב אותן להצלחות גדולות, החליט ליסנקו כי הגנטיקה אינה מסוגלת להסביר אותן. ללא

כל היסוס, הוא רקח את התיאוריה העצמית שלו, תיאוריה חלופית, ללא כל סימוכין של ניסויים, על בסיס תורשה של תכונות נרכשות. הוא יצא אז בהתקפה על האסכולה הסובייטית של הגנטיקה, שהייתה עד אז מבריקה ביותר. השרלטן הזה היה פָּרָנואיד.

כאשר קוראים את ההצהרות של ליסנקו, הסגנון כמו התוכן מעידים בבירור על חוסר סמכותו המוחלט, בורותו לא רק בביולוגיה היסודית ביותר, אלא גם בעצם הגישה המדעית. כפי שהוכיח ז'אק מונו (Mono, Jacques – Préface à **Grandeur et Chute de Lyssenko** de Jaurés Medevedev, Gallimard, Coll. "Témoins", 1971) הן מזכירות את אותם קונטרסים שמפרסמים על חשבונם אוטודידקטים, המשוכנעים כי גילו את סוד החיים או את ריפוי הסרטן וזועמים על ש"המדע הרשמי" מתעלם מהם. אך מה שיותר מביך, מה שמוכיח את פקחותו של ליסנקו, היה שהוא הצליח להשיג את תמיכתו של סטלין, ועמו של כל הרשויות הסובייטיות, המדינה, המפלגה, מערכת המשפט, העיתונות. הודות לכך זכה לניצחון מוחלט על אויביו. הוא הביא לאיסור העיסוק בגנטיקה והוראתה. אלה שסירבו לתמוך בתיאוריות שלו הוגלו לסיביר, ורבים לא שבו משם. מובן מאליו, מה שהיה תקף בברית המועצות, היה תקף גם בארצות שבהן שלטה. וכך נאסרה הגנטיקה בכל הדמוקרטיות העממיות. בבודפסט שבהונגריה, הפקולטה בשלמותה, בהנהגת הרקטור, הובילה בחגיגיות אל המחראות והשליכה אליהן את אוספי זבובי הפירות ששימשו למחקר ולהוראה. בבְּרנו, פסלו של "הנזיר מנדל" הורד מכנו והושמד. אשר לאפונים ששימשו לניסיונותיו של מנדל, הם נעקרו מגינת המנזר. לא להפריך, אלא להרוס!

המדהים ביותר בכל הפרשה הזו, הם הנימוקים שבהם השתמשו ליסנקו וחסידיו. כאשר הוא התווכח עם הגנטיקאים הסובייטיים, הוא מעולם לא הביא בחשבון את נתוני המדע הניסיוני, את אין ספור התוצאות שנצברו מזה שלושים שנה בקירוב בארצות שונות בעבודה של אנליזה גנטית על תורשת החיות והצמחים. הביולוגים האמיתיים הטילו ספק בהצלחות המפתיעות בחקלאות שבהן התהדר, ואלה לא הצדיקו במאומה את התקפותיו החריפות על הכרומוזומים. כאשר ליסנקו דיבר על ביולוגיה, דבריו היו כה עלובים, כה מגוחכים אפילו, שהם שללו מיד כל אפשרות להעניק אשראי כלשהו ליומרותיו האגרונומיות. הנה מה שסיפר בוריס אפרוסי (Boris Ephrussi), שהיה הראשון לפרופסורים לגנטיקה בצרפת. בהיותו ממוצא רוסי, היתה לו הזדמנות לדון ארוכות עם ליסנקו, שאותו תאר כאדם צר-מוח, הפולט ללא היסוס שטויות נוראות, כגון: יש שני סוגי גלוקוזה, זה של צמחים וזה של בעלי חיים! או: החומצות האמיניות משמשות קודם כל לשיווי המשקל האוסמוטי של התאים! או גם: בתוך התאים, הציטופלסמה היא המקנה לגרעין את תכונותיו! כולן סברות שאין להן כל שמץ של ראייה.

בשביל ליסנקו וחסידיו מושג המין הביולוגי (species) לא היה אלא רעיון בורגני. הם לא היססו לעשות פרסומת רחבה לניסויים שאפשרו להם להפוך מין אחד לאחר: חיטה לשיפון, שיבולת-שועל לשעורה, כרוב ללפת, ואחר כך לאשוח. מבצעים אלה היו אמורים להעיד על ההצלחה של המדע המתקדם! למעשה, בשביל ליסנקו לא היה הוויכוח האמיתי בתחום המדעי אלא בתחום האידיאולוגי. הנימוק שבו השתמש ללא הרף נגד הגנטיקה היה אי-התאמתה אל המטריאליזם הדיאלקטי. זה היה בשבילו סלע המחלוקת הממשי, יסוד הבעיה, הבסיס היחיד שעליו יכול היה לקבל את תמיכתו של סטלין ושל כל השלטון הסובייטי. כאן ורק כאן היה לו סיכוי לנצח, להשליט את רעיונותיו, לרמוס את אויביו. ועובדה היא כי ליסנקו צדק בהחלט. בין אם נביט בה כך או אחרת, מצד זה או מצד אחר, אי אפשר לחבר את הגנטיקה אל הדיאלקטיקה. התיאוריה של הגנים אינה יכולה להתקשר אל הדיאלקטיקה של הטבע לפי אנגלס. לא יותר מאשר תורת דרווין, התיאוריה של הברירה הטבעית, אשר גם אותה שלל ליסנקו. בעבורו, רק התורשה

של תכונות נרכשות, שהוא העריך כי הוכיח את תקפותה, אפשרה לשנות לאורך זמן את הטבע, כלומר להתאים לדוקטרינה המרקסיסטית. בשביל סטלין, אם כן, לא היה כאן שום היסוס.

אך בעוד אשר ניתן להבין כי תחת לחץ הטרור האידאולוגי של הדיקטטורה המשטרתית, נאלצו הביולוגים הרוסים להיכנע, לחבור אל ההנחות של ליסנקו, מה נאמר על אלה במערב אשר, ללא כל אילוץ, מבלי לחשוש לחייהם, לחירותם, לפרנסתם, תמכו בהתלהבות תמוהה במארג זה של שקרים וסתירות? איך אפשר לשכוח את ההשתלהבות של עיתונות מסוימת ושל אינטלקטואלים של השמאל, מסנוורים בלהיטותם, מחושקים באידיאולוגיה שלהם, מובלים לוויתור מוחלט על ההיגיון, אל העלבונות הגרועים ביותר לחשיבה. מאין בא העניין הפתאומי הזה בביולוגיה אצל אנשים שעד אז היו גאים בהתעלמותם או אפילו בבוזם למדע, כה בטוחים היו בעליונות ללא עוררין של התרבות על הטבע?

עליי השפיעה פרשת ליסנקו באופן הפוך. לאחר המלחמה, כאשר התחלתי לנסוק, היא היתה בעיצומה. היא תרמה לכוון אותי אל המדע, וליתר דיוק, אל הגנטיקה. גיליתי בתדהמה כי באמצע המאה העשרים ניתן לשרלטן לקבל בארצו את תמיכת השלטון כדי לכפות, מצד אחד, תיאוריה "מדעית" אווילית, ומצד שני, עשייה חקלאית אסונית. יכול היה אדם ללא נקיפות מצפון להצליף ללא רחם כדי להרוס את אחד המדעים היותר מבוססים. דבר לא מנע בעד רודנות פוליטית מלכלוא מדענים שהואשמו בעיסוק ב"מדע בורגני" בשירות פוליטיקה ריאקציונית. ומעל לכל גיליתי, אולי בתדהמה גדולה עוד יותר, שאנשים כה חופשיים כמו האינטלקטואלים שלנו, המסתופפים מאחרי המשורר הקומוניסט אראגון ולכודים בהתלהבות האידיאולוגית, יכלו לרדת אל התרפסות ולהשפיל את עצמם עד כדי כך. לעסוק בגנטיקה היה אז בעיניי הסירוב להחליף את ההיגיון באי-סובלנות קנאית.

ליסנקו נותר זמן רב בתפקיד. די זמן כדי להרוס את הביולוגיה ואת החקלאות של ארצו, והן עדיין לא התאוששו לחלוטין מההרס. הוא האריך ימים אחרי סטלין. אך לבסוף נעלם בתחילת שנות השישים, תחת התקפות הפיזיקאים הסובייטיים. בניגוד לעמיתיהם הביולוגים, להללו היתה אפשרות, בגלל הנשק הגרעיני, לנסוע ולהשתתף בכנסים בעולם. ראשיתה של הביולוגיה המולקולרית עניינה את הפיזיקאים במערב, וכמה מהם אף מילאו בה תפקידים ראשיים. במגע אתם הבחינו הפיזיקאים הרוסים עד מהרה באווילות ובהרסנות של עמדות ליסנקו. הם הצליחו לשכנע בכך את הרשויות הסובייטיות. לאחר עליות וירידות, הודח לבסוף ליסנקו מתאריו ומשלטונו. בברנו הושב הפסל של מנדל אל כנו. האפונים נשתלו שוב בגינה. וכך יכול היה להתקיים הכנס של יובל המאה.

לאחר האפונים החלה הגנטיקה לעסוק בזבוב. הלה אינו רק מושא חביב על הגנטיקאים. הוא משמש לכול: לדוג בחכה, לקשט את לֶחְיֵי הנשים או את סנטר הגברים, לירות ברובה או באקדח, לשחק בקלפים. ובעיקר לשעשע את הילדים.

היה זה חבר בבית הספר שהכניסני בסוד ההנאות מן הזבוב. בכיתה ג' היה לאחד מחבריי לכיתה סבר פנים אומלל במיוחד. כחוש, לחייו שקועות, ברכיו עקומות, בגדיו צרים מדי, אנטואן משך אליו חמלה כבר ממבט ראשון. יתום מגיל רך, הוא חי אצל דודתו, מרשעת של ממש, לפי דבריו. כולה זעופה, מרושעת ומחמירה, היא הצליפה ברגליו בחגורה על כל ציון שלא נראה לה טוב דיו או על כל תשובה שנראתה לה חצופה. תיאוריו של אנטואן את דודתו גרמו לי לחלומות בלהה.

אבל היתה לו נחמה, לאנטואן: היו אלה הזבובים. נעשינו חברים טובים. היה לו אמון בי. בהפסקה, היה גורר אותי תכופות אל פינה בחצר כדי להראות לי את זבוביו. אז היה מוציא מכיסו

כלוב זבובים עשוי משתי דסקיות שַׁעַם שנחתכו מפקק וחוברו בשורת סיכות ששימשו כסורגים. בתוך הכלוב נראו כמה זבובים מצומקים שגררו את עצמם מסורג לסורג.

בימים מסוימים, שבעיניו היו מיוחדים, היה אנטואן מבצע את מה שהוא קרא "המשחק הגדול". הוא היה מרים סיכה, ובאצבעותיו הרזות והמלוכלכות היה צד את אחד הזבובים בכלוב. "ננסה להבין איך זה פועל, זבוב", היה אומר. לשם כך היה מתחיל "לפרק" את הזבוב. היה תולש את הרגלים אחת אחת במשיכה חדה, כפי שתולשים שער. נותר גוף הזבוב עם הכנפיים. לגבי אלה הוא פעל אחרת. הוא היה מושך אותן בעדינות, כדי "לנתק אותן", כך היה אומר, מבלי לקרען. לאחר מכן הוא היה רוצה "להרכיב מחדש את המערכת" ולהשיב כל חלק למקומו. אבל בזה לא היה לו כל סיכוי. כל מה שיכולנו לעשות היה לעקוב אחר גסיסתו של הזבוב; לצפות בריטוטים ששככו אט אט עד לאפס תנועה.

"להבין איך זה פועל, זבוב", זו היתה שאיפתם של הגנטיקאים במשך כל המאה העשרים. היה זה אמריקני, תומס הנט מורגן (Thomas Hunt Morgan), אשר ראשון העלה את זבוב התסיסה (דרוזופילה) למעלת הפריט המועדף לחקר התורשה. מורגן היה אמבריולוג. במשך זמן רב הצטמצם חקר התפתחות העובר בבחינה מורפולוגית. צפו במיקרוסקופ בשינויי הצורה של העובר ובריבוי המתבדל של התאים לפי אזורי הגוף. בסוף המאה ה-19 החלו לחקור תופעות אלה באופן ניסויי. אבל מה שקראו "המכניקה של ההתפתחות", כלומר הכוחות המאפשרים למבנה בעל ארגון כה מזערי כמו ביצית להפוך למערכת כה מורכבת כמו היצור החי, זה נותר מחוץ להישג הניסוי. כך שכדי להסביר מהפך אדיר כזה, שנראה מעל לכל אפשרות של הבנה, הציעו אמבריולוגים מסוימים מעין כוח חיוני (force vitale) – "עקרון התפתחות" שלא נבע מחוקי הפיזיקה. למורגן ולידידו וילסון (E.B. Wilson), לעומת זאת, היה ברור כי צריך לחפש בתורשה את המכניקה שבאמצעותה נוצרת תרנגולת מביצה של תרנגולת, ומביצית אנוש נוצר יצור אנוש. מכאן החלטתו של מורגן לחקור קודם כול את התורשה. הוא עבד תחילה עם עכברים וחולדות, אבל זנח אותם עד מהרה משום שהיונקים היו יקרים מדי, התרבו לאט מדי ונפגעו בקלות רבה מדי מזיהומים. מורגן פנה אז אל זבוב התסיסה, הדרוזופילה (Drosophila).

דבר לא יעד מראש את הזבוב לגורל של תהילה במדע. מוצאים אצל אריסטו איזכור של זבובון שנולד משיירי חומץ. מדובר בוודאי בקרוב של זבוב התסיסה. מין זה תואר וקיבל שם בראשית המאה ה-19. אפשר להצטער על שם זה, דרוזופילה, כלומר חובב נוזלים, שגבר על שם אחר, שתיין-יין (Oenopote), שבו השתמשו כמה אֶנטומולוגים. המין הנודע ביותר Drosophila – melanogaster – תואר באמצע אותה מאה. נראה שמוצאו באזורים הטרופיים. סביר להניח כי הובא לאירופה ולארצות הברית עם יבוא הבננות.

זבוב קטן זה הופיע במעבדה של אוניברסיטת הרווארד בראשית המאה העשרים. הוא הפגין עד מהרה תכונות ראויות לציון: הוא קטן מאוד, וקל לגדלו במעבדה; הוא עומד יפה בניסויים של מוטציות והכלאות; מתרבה במשך כל השנה ללא הפסק – דור חדש בכל שנים-עשר יום, כלומר כשלושים דורות בשנה; כל נקבה מטילה כאלף ביצים; קל להבחין בין זכר לנקבה; ארבעה כרומוזומים בלבד. בקיצור, בעל החיים האידיאלי לחקר התורשה.

מורגן עבד אז באוניברסיטת קולומביה בניו-יורק. עמית ממעבדה סמוכה ציין בפניו את מעלותיו של זבוב התסיסה. הדוגמיות הראשונות הובאו למעבדה של קולומביה ב-1907 על ידי סטודנט של מורגן. הלה הֵחל להתעניין בכך בעצמו הָחל מקיץ 1909. עד מהרה הופיעו בתרבית טיפוסים חדשים. במיוחד, זכר בעל עיניים לבנות ולא אדומות כמו של שאר בני מינו. אירוע זה

הניע מבול של תוצאות. בקרב צאצאיו נמצאו פרטים לבני עיניים. הייתה זו אפוא מוטציה. אבל התכונה "עין לבנה" נורשה בדרך מאוד מיוחדת. רק לחלק מהזכרים היו עיניים לבנות. הנקבות היו כולן בעלות עיניים אדומות. דובר אפוא בתכונה נסגנית [רצסיבית] הקשורה במין (sex). הופיעו עוד תכונות במוטציות, אחדות מהן קשורות במין. הגנים הקובעים תכונות אלה היו ממוקמים אפוא בכרומוזום X. בתוך כמה שבועות הוכיחו מורגן וסטודנט שלו כי מתקיים שחלוף של קטעים בין כרומוזומים הומולוגיים וכך מתרחש צירוף מחדש, רקומבינציה של תכונות. הם הראו עוד כי כמות השִחלופים היא מדד למרחק בין התכונות על הכרומוזום, והניחו את היסודות למיפוי הגנים על הכרומוזום בשיטה זו.

מורגן הבין אז כי הזבוב עומד לאפשר לו לפענח את התורשה. הוא לקח לעבודה כמה סטודנטים מבריקים במיוחד – ברידג'ס (Bridges), סטורטוונט (Sturtevant), ומולר (Muller) – ואותם הושיב במעבדה שנקראה מאז "חדר הזבובים". ושם חוללו מורגן וצוותו פלאות.

חדר הזבובים היה חדר די קטן שבו נערמו שולחנות, שולחנות כתיבה, מיקרוסקופים ובקבוקים שבהם גודלו הזבובים. פעלו שם כעשרה חוקרים, סטודנטים, פוסט-דוקטורנטים ואורחים. מחדר זה פרצו רעיונות כמו טילים. הניסויים נקשרו זה לזה בסדרה בלתי פוסקת של תגליות, ויכוחים ותיאוריות. עבודה זו בשיתוף פעולה הדוק, שבו נמצאו מורגן והסטודנטים שלו בכל יום באווירה של התרגשות והתלהבות, מהולות בחוש ביקורת, נדיבות ופתיחות רוחנית, מהווה את אחת האגדות הגדולות הנדירות בתולדות הביולוגיה. בחדר הזבובים היו חילופי הדברים תמידיים. ברגע שהופיעו תוצאה חדשה או רעיון חדש, הם נדונו בחופשיות על ידי הקבוצה. עד כדי שכחה מי היה הראשון שהעלה את הרעיון. זה יכול היה רק להמריץ את העבודה.

מאות אלפי זבובים גודלו על ידי מורגן וקבוצתו. צצו שם מוטנטים בזרם מתמשך. תוך כמה שנים התבהרו שם האפיונים העיקריים של התורשה, מה שעמד להפוך ל"חוקים" של הגנטיקה. כפי שמדגיש זאת ארנסט מאייר (Mayr, Ernst – **The Growth of Biological Thought**, Harvard University Press, Cambridge, Mass, p. 754), במקום שבו כל הגנטיקאים האחרים של המאה ה-19 ושל ראשית המאה העשרים לא יכלו למצוא את התשובות הנכונות, משום שלא הציגו את השאלות הנכונות, מורגן הצליח באופן מבריק. אולי משום שבמקום להציג שאלות על הפיזיולוגיה ועל הכימיה של הגנים, ובלי להתפלפל על תיאוריות אפשריות של התורשה, הוא דבק בעובדות. בכך הוא מיסד את הגנטיקה המסבירה את התורשה המנדליאנית במונחים של תיאוריה כרומוזומית.

הפעילות של חדר הזבובים נמשכה במשך קרוב לעשרים שנה באוניברסיטת קולומביה. משם היא הקרינה על רוב המעבדות והאוניברסיטאות בעולם שבהן הצטברו מוטנטים. אט אט מתחדדים חוקי הגנטיקה הקלאסית והמכניקה הכרומוזומית. התמונה שאליה הגיעה הגנטיקה הזו בשנות השלושים היא של גנים המושחלים בשורה על הכרומוזומים "כמו חרוזים בשרשרת".

מיקום הגנים על הכרומוזומים על ידי מורגן וצוותו פותח בפני הביולוגיה שורה שלמה של שאלות חדשות. מהו טבעם הכימי של הגנים? באיזה חומר שוכנת התורשה? כיצד מתרבים הגנים? כיצד הם פועלים כדי לקבוע את תכונות התא והאורגניזם?

רמז ראשון לתפקוד הגנים בא מן הרפואה עם מה שעמד להיות מכוּנֶה מחלה גנטית. ב-1902 התעניין הרופא האנגלי ארצ'יבלד גארוד (Archibald Garrot) באַלקַפְּטוֹנוּריה (alcaptonurie), מחלה המתבטאת בין השאר אצל הגבר בצבע שחור של השתן. בשביל גארוד היתה מחלה זו

תוצאה של מה שהוא קרא "טעות מולדת של חילוף החומרים", כלומר ליקוי מולד שגרם להפרעה בשרשרת חילוף חומרים המביאה ליצירת השְׁתָן (urea).

אך כדי להעמיק בסוגיה זו, כדי לענות על כל השאלות הנוגעות לגנים, הזבוב לא היה כלל אמצעי מתאים. ניתן היה אומנם להתבונן במיקרוסקופ בכרומוזומים – בעיקר בכרומוזומים הענקיים המצויים בבלוטות הרוק של הזבוב – ולהבחין שם ברצועות בגודל לא שווה, אך לא ניתן היה לקבוע מִתאם כלשהו בין רצועות אלה לתפקידים המיוחסים לגנים. ניתן היה בהחלט, כפי שעשו בוריס אפרוסי וג'ורג' בידל (George Beadle), להשתיל אברים, כגון עיניים, שמקורם בזבובים שעברו מוטציה על זבובים רגילים, ולהפך, אך נתקבלו מכך רק תוצאות עקיפות ולא משכנעות. עד למלחמת העולם השנייה הצטמצמו על כן הרעיונות בקשר למבנה הגנים בהשערות שאותן אפשרו הנתונים שהתקבלו מלימוד המוטציות וההשפעה של גורמי מוטציות כגון קרני X.

בסוף שנות השלושים הוגלה הזבוב אל מחסן הגרוטאות. מיקרו-אורגניזמים – פטריות, שמרים, חיידקים ונגיפים – תפסו את מקומו ושמרו על מעמדם כמושאי מחקר מועדפים קרוב לשלושים שנה. ובאמת, הודות לחיידקים הובהר תפקידה של חומצת הגרעין – הדנ"א – כחומר הנושא את התורשה בגנים, הובן ביתר דיוק הקשר בין גנים לחלבונים, הוגדר המנגנון של סינתזת החלבונים, פוענח הצופן הגנטי, נתגלה התהליך של קיפולי הגנים; בקיצור, הודות לחיידקים נקבעו טבעם ותפקידם של הגנים.

אז ניתן היה לגשת אל אנליזה גנטית של תא החיידק ושל תפקידים מסוימים שלו. בייחוד הוכחנו, יחד עם ז'אק מונו, כי לא כל הגנים פועלים בתא כל הזמן. רבים מהם פועלים רק לפי דרישה, בהתאם להרכב הסביבה ולצורכי התזונה של החיידק. כדי לשנות את פעילותם של גנים רבים, קיימים מעגלי בקרה, שהם עצמם נשלטים על ידי גנים מיוחדים.

בעוד שהגנטיקה המולקולרית החדשה אפשרה לחדור עד אל תוך תוכו של תא החיידק, האורגניזמים המורכבים נותרו מחוץ להשגתה. את אלה ניתן היה עדיין לחקור רק באמצעות האנליזה הקלאסית, זו הנסמכת על הצלבות בין אורגניזמים השונים בכמה תכונות, או באמצעות טכניקה חדשה: איחוי של תאים, המאפשר למקם גנים מסוימים על הכרומוזומים ולחקור תפקודים מסוימים. אבל הדנ"א של אורגניזמים אלה כה מורכב, עד כי במשך זמן רב לא יכלו לו שיטותיה של הגנטיקה המולקולרית.

בקיץ 1972 התקיים בציריך, ביזמתו של ארנסט הָדוֹרן (Ernst Hadorn), כנס מעניין במיוחד. הדורן היה אמבריולוג. הוא חקר תחילה את עוברי הדו-חיים. אולם, בגלל הקושי לנתח בחומר זה את הגורמים הגנטיים של ההתפתחות, הוא הגיע אל זבוב התסיסה. הדורן חקר את ההתמיינות (differetiation) של "הטבעות המדומות", (imaginal discs), אלה קבוצות התאים המכינות אצל הזחל את עיצובו של הבוגר. כי הזבוב הבוגר נבנה כמו מכונית: יש דיסק האחראי ליצור כל עין; אחר בשביל ליצור כל כנף; אחר בשביל כל רגל, וכו'. האלמנטים מוכנים אפוא לחוד, ולבסוף מורכבים יחד. התמיינות זו תלויה בפירוש בגנים. כדי לנסות לסגור את הפער שהפריד בין המחקר הגנטי של זבוב התסיסה וזה של החיידקים, הזמין הדורן חמישה-עשר מומחים של זבוב התסיסה וחמישה-עשר מומחים לביולוגיה מולקולרית. אלה וגם אלה סיפרו את סיפוריהם, בהשתדלם לדבר בפשטות ולהיות מובנים על ידי האחרים. אולם, בין שתי הקבוצות נותרה תהום פעורה. איש לא ראה כלל כיצד לחקור את הזבוב ביכולת של הטכניקות שבהן השתמשו לגבי החיידקים.

כמה שנים לאחר מכן השתנה הנוף מן הקצה אל הקצה. לאט לאט למדנו לטפל בדנ"א אצל החיידקים. עד מהרה גילינו איך לחתוך את הסיבים הארוכים הללו בנקודות שנבחרו, לאחות קרעים שלהם בקצותיהם, ולשבץ מקטעים בכרומוזום. כל הטיפולים הללו ידועים בשם הנדסה

גנטית. עם הזמן התאפשר לטפל בכמויות אדירות של דנ״א המצויות באורגניזמים המורכבים, לזהות בהם גנים מסוימים, לבודדם, לייצרם בעותקים רבים ולתאר בפרוטרוט את האנטומיה שלהם. ניתן אפילו לקחת גן מאורגניזם אחד כדי להחדירו אל אחר ולנתח לפרטים את תפקודו. מאז הלך והתמלא בהדרגה הפער שהפריד בין חיידקים לאורגניזמים מורכבים. האנליזה הגנטית יכולה לחול על כל אורגניזם שהוא, לרבות האדם. השיטות של הגנטיקה המולקולרית מאפשרות אפילו לעקוף את אלה של הגנטיקה הקלאסית, למנוע הכלאות בין אחים ואחיות או בין הורים וילדים, מה שאי-אפשר לעשותו כשמדובר בבני אדם. מכאן ואילך יכולה הגנטיקה האנושית להמשיך להתפתח.

הזבוב מצא לעצמו שוב חיים חדשים במדע. הוא חזר להיות האורגניזם המועדף לחקר אחת הבעיות היותר כבירות של הביולוגיה: התפתחות העובר. ובמיוחד, לחקירת תפקיד הגנים בהתפתחות זו. כי עצם העובדה שכלב נולד מכלב וחיטה מחיטה מוכיחה בבירור כי הִתרבות העובר והתפתחותו נשלטות על ידי הגנים. אך אין זה ברור כיצד יכולים הגנים לעצב את הצורות של האורגניזם החדש בהתפתחותו. וגם לא כיצד מתא, מביצית מופרית, יכולים להיווצר ולהתבדל מיליארדי תאים הכוללים כולם את אותם גנים, אך נוצרים מהם מבנים כה שונים כמו תאי עצב, תאי עצם, תאי שריר, תאי מעי וכו׳.

עד שנות השבעים נותר סוג שאלות זה מעבר להישג ידה של הביולוגיה הניסויית. אך עם האפשרות לבודד גן שהובחן אצל אורגניזם, לנקותו, לזהות את הרצף שלו ולהכיר את דרכי תפקודו, נפתח פתח לגישה חדשה אל חקר התפתחות העובר. במקום השאלה הישנה: ״כיצד פועלת התורשה של הזבוב?״ נשאלת עתה שאלה אחרת: ״כיצד נבנה זבוב?״, אותה שאלה שהציג ידידי הקטן מתיכון קַרנוֹ. עד אז ליקטו מוטציות כדי שישמשו כנקודות ציון, כאמצעי לסמן את הכרומוזומים במטרה לנתח את דרכי פעולתם. מכאן ואילך, העניין במוטציה הוא לאפשר את הבנת תפקיד הגנים בבנייתו של בעל-חיים. אם מוטציה גוררת אֲנומליה בהתפתחות – הופעת זבוב מעוות, זחל שאינו בנוי כהלכה – סימן שהגן שחלה בו מוטציה משחק תפקיד מוגדר בשלב כלשהו של הבנייה. סימן שהוא שולט בתהליך חיוני להגשמת שלב זה. כל אוצר המוטציות הישן של זבוב התסיסה נבחן עתה במבט חדש. כך, למשל, בודדו ב-1916 מוטנט מפתיע של זבוב התסיסה: זבוב אשר במקום זוג כנפיים אחד היו לו שניים. באותה תקופה, פרט לאופייה הציורי והמעורר תהיות, לא ייצגה מוטציה זו על המפה הגנטית של הזבוב אלא נקודה ממוקדת על הכרומוזום. והנה, בשנות השבעים, זכתה מוטציה זו להכרה בחשיבותה בשל השינוי המורפולוגי שהיא גורמת אצל הזבוב. ומכאן השאלה: כיצד יכולה מוטציה לשנות חלק מן הגוף? כיצד היא יכולה, בַּמקום שבו מצויות בליטות הייצוב הקטנות על הפרק השלישי של החזה, לקבוע כנפיים? מה שמוכיחה מוטציה זו, היוצרת מפלצת בעלת ארבע כנפיים, הוא כי צורת החיה נקבעת על ידי הגנים עד לפרטי פרטיה.

מפלצתית הרבה יותר הייתה מוטציה שבוּדדה ב-1970. לזבוב הנורמלי יש מעל לכל עין מְעין מחוש. יום אחד הופיעה בתרבית מוטציה שבה במקום מחוש הופיעה רגל! מוטנט שני זה אישר את המסקנות שנבעו מן הראשון: גנים הם אמנם אלה המכוונים את בניית החיה. פרט לכך, תרמו שתי מוטציות אלה ידע חשוב: האנומליות הגנטיות הרווחות ביותר אינן מביאות ליצירת מבנים חדשים, שלא היו ידועים קודם לכן. בשני מוטנטים אלה התבטאה האנומליה בהופעת אבר במקום שלא ציפו לו; זוג כנפיים במקום הבליטות במקרה הראשון, רגל במקום מחוש במקרה השני. כאילו באזור מסוים בגוף היו כבר כל המרכיבים הנחוצים ליצירת אזור אחר, מוכנים לבוא לידי ביטוי אם רק תינתן להם ההוראה לכך.

ניתן אפוא לחקור את המערכת הגנטית המהווה אצל הזבוב תשתית להתפתחות העובר. הבעיה היא אם כן לבודד את המוטציות המשנות לא את חומרי הבניין אלא את הגורמים המארגנים חומרים אלה וכך מעצבים את צורת החיה. מוטציה היא שינוי, יהא אשר יהיה, במידע הגנטי; כלומר בשרשרת הבסיסים המהווים את הטקסט הגנטי: החלפת אות אחת באחרת, תוספת או גריעה של אותיות, שבירת הרצף, היפוך, העברה, צירוף וכו'. בקיצור, כל שגיאה המוכרת לנו בהדפסת טקסט. משהופיעו במפתיע, חוזרות שגיאות אלה בקביעות בדורות הבאים. המוטציות נוצרות מעצמן בתדירות נמוכה. ניתן להמריצן באמצעים שונים: הקרנה, טיפול כימי וכו'. הקושי הוא לחשוף את המוטציות, שהן אירועים נדירים, באוכלוסיות שהן בהכרח גדולות. להשיג מוטציות פירושו אפוא להגביר את תדירותן, ואז, בעיקר, לזהותן, ולבסוף, אם אפשר, לברור אותן. כדי להשיג מוטציה רצויה, צריך קודם כול לדמיין את התוצאות הסבירות שלה. זה מעל לכול עניין של תושיה וסבלנות.

תושיה וסבלנות, אלה לא חסרו מעולם לגנטיקאים של הזבוב. בעיקר לא לכריסטיאנה ניסליין-וולהרד (Christiane Nüsslein-Volhard) ולאריק וישהאוז (Eric Wieschaus). משהוגדרה המטרה בדיוק – התפתחות העובר – הם השיגו תוך כמה חודשים את אשר חיפשו. עלה בידם לפרק לגורמים את התהליכים הקובעים מן השלבים הראשונים של חיי העובר את תכנית המתאר של בעל-החיים העתידי. כפי שניתן היה לצפות, אדריכלות זו נבנית בשלבים, כאשר כל שלב נשלט על ידי קבוצת גנים ייחודית.

אחת השאלות המטרידות מזה זמן רב את האמבריולוגים היא השאלה הבאה: מהו החלק שלוקחים הגנים של האם בבניית העובר לפני ההפריה? או מוטב: האם בביצית הנוצרת על ידי האם, אשר לאחר ההפריה תהווה את העובר, חוץ מפעולת הכרומוזומים של העובר, קיימים יסודות ציטופלסמיים שמקורם באם, והאם הם נושאים מידע גנטי הנחוץ לבניית העובר מעבר לזה הנמצא בכרומוזומים של העובר? התשובה לכך ניתנה רק בזמן האחרון: אכן כן. בין השלבים הקובעים את מבנה העובר, הראשונים נשלטים על ידי הגנים של האם. רק אחר כך יכולים הגנים של העובר עצמו להיכנס לפעולה כדי לכוון את השלבים הבאים.

נס זה של הטבע, התהוות יצור חי מתא בודד, מביצית מופרית, נותר במשך זמן רב אחד המפלטים האחרונים של הוויטליזם [היא התפיסה המחפשת את ההסבר לחיים במונחים של "הכוח החיוני" ה-force vitale, שאינו מכניסטי-פיזיקלי]. כיום כבר מתארים אותו במונחים של כימיה על ידי המבנה ופעולות הגומלין של המולקולות המעורבות בתהליך זה. בשלבים הראשונים, אלה שאותם מכוונים הגנים של האם בעת שהיא יוצרת בהדרגה את הביצית, מסתמנים קווים מנחים המשמשים לניתוב מבנה העובר, וקובעים מה לפנים ומה מאחור, מה צד הגב ומה צד הבטן. בפעולתם נוצרת רשת קואורדינטות המאפשרת לתאים הנוצרים בעובר למקם את עצמם ולהגדיר את זהותם. התחלה זו של ארגון מוסדרת עוד לפני ההפריה.

לאחר שנקודות ציון אלה נמצאות במקומן, לוקחים על עצמם הגנים של העובר את השליטה בגורלו ובהתפתחותו ההדרגתית תחת הכוונתם של הגנים העובריים. גוף העובר, שהוא הביצית המופרית, מתחלק לכעשרה מקטעים. מקטעים אלה, הזהים עד כה, מתמיינים לאחר מכן וכל אחד רוכש זהות ייחודית. כך רואים כיצד מסתמן הראש העתידי, עם העיניים, הלסתות והמחושים; החזה העתידי עם זוג כנפיים ושלושה זוגות רגליים; הבטן העתידית ובקצה אזור פי-הטבעת. כך מסתמן בהדרגה גוף היצור העתידי בסדרת אירועים העוקבים זה אחר זה בדייקנות.

שיטות הביולוגיה המולקולרית אפשרו כמובן לבודד את מרבית הגנים הללו, לתאר את המבנה שלהם בפרוטרוט, להשוותם, לזהות את מקומותיהם ואת מועדי פעילותם בעובר, ולשרטט את התוצר הסופי. כך הוכח קיומו של סוג גנים שפעולתם קובעת את צורת האורגניזם. גנים אלה פועלים את פעולתם בקבוצות תאים ייחודיות מאוד שאותן יודעים לזהות. הם חולשים על התהליכים הייחודיים להתפתחות העובר. כאשר משווים את המבנה של גנים אלה, את רצפי הבסיסים שלהם, נוכחים לדעת כי הם בנויים מרצפים של קטעי דנ״א קטנים יחסית המצויים בגנים רבים. נראה כאילו רוב הגנים הללו נבנו מצירוף מספר מוגבל של קטעים גנטיים המסוגלים להתחבר אלה עם אלה. ושוב, המורכבות בטבע נולדת מצירופים שונים של מספר יסודות קטן.

מערכת צירופים זו מקבלת משמעות חדשה כאשר בוחנים את התוצרים של גנים אלה, החלבונים הקובעים את ההתפתחות העוברית. כל אחד מקטעי דנ״א אלה מייצר שרשרת של פוֹלִיפֶּפְּטידים התואמת לתחום אחד, למוטיב חלבוני שצורתו התלת-ממדית ומטענו האלקטרוסטטי קובעים את יכולות ההבחנה ותגובות הגומלין המולקולריות שלו. כל הגנים הללו, המכוונים את התהליכים המעורבים בשלבים הראשונים של חיי העובר של הזבוב, משפיעים על דרכי פעולתם של גנים אחרים בהמריצם או בבולמם את הפיכתו של קטע דנ״א לרנ״א. החלבונים המווסתים, תוצריהם של גנים אלה, כוללים כולם במבניהם תחום המסוגל לזהות באופן ייחודי אזור של דנ״א השולט על פעילותו של גן שכן. כלומר, יש לכל אחד מהם אזור בעל זיקה חזקה אל קטע של דנ״א. יש מספר מוגבל של תחומים כאלה, הקרויים בשמות מוזרים – לפי הסדר homéoboîte, ״אצבעות אבץ״, ״כינה״ וכו׳. זה תקף בין השאר בנוגע לסוללה של עשרה גנים, הגנים ,HOM, אשר מגדירים אצל עובר הזבוב את זהותם של קטעים שנוצרו זה עתה. סדרת הגנים HOM בונה מדרג חומרים לאורך הציר הקדמי-אחורי [כלומר, קו העובר בין קדמת הגוף לאחוריו] של החיה. המדרג מאפשר לתאים למצוא את דרכם לאורך הציר, לדעת כך את מיקומם בעובר; ומרגע שהתמקמו, הם מחויבים למסלול התפתחות מוגדר. מוטציה באחד מהגנים HOM היא הגורמת לאותו סוג של טעות בזיהוי של פרק בגוף העובר, המובילה ליצירת זבוב בעל ארבע כנפיים במקום שתיים, ליצירת רגליים על הראש במקום מחושים.

אנו מתחילים אפוא להבין ״כיצד הולך ונוצר זבוב״, כפי שהיה אומר חברי הקטן לכיתה. החיה נבנית בצורת קטעים חוזרים ונשנים, פרקים או יחידות רב-תאיות. בתוך הפרקים האלה מתרחשת התמיינות של התָאים במסלולים מוגדרים היטב. תפקיד הגנים של העובר, הנכנסים ראשונים לפעולה, הוא לתחום את גבולותיהן של היחידות, שכולן זהות בהתחלה, כולן העתקים של קדם-יחידה בסיסית. תפקידם של הגנים ההוֹמֵאוֹטיים הללו, הגנים HOM, הוא לחולל בכל אחד ממקטעי העובר שינויים בעקרונות הפעולה הכלליים המבטיחים את התמיינותו מתוך מבנה המקטע הבסיסי. הם מביאים בכל מקטע לשינויים ייחודיים, ובכך מעניקים לו את זהותו. למעשה, כל מקטע, כל אזור, מוגדר על ידי צירוף ייחודי של כמה גנים HOM הפועלים במקביל בכל תא שבאזור.

קיומם של מוטנטים אלה מגלה היבט נוסף של המנגנון. אם על ראשו של המוטנט השני החליפה רגל את המחוש, הרי זה משום שגן כלשהו שותק על ידי המוטציה. הגן הזה פועל אצל זבוב נורמלי. ובין היתר, פעולתו של גן זה היא אשר מונעת את צמיחת הרגל במקום המחוש. ולבסוף, מוטנטים אלה ממחישים את האפשרות לחקור את המערכת הגנטית, המהווה תשתית להתפתחות העובר של זבוב התסיסה. מה גם שהזבוב חי בשתי צורות חיים: של זחל ושל בוגר. מוטציות רבות, שאינן עולות בקנה אחד עם חייו של זבוב, מאפשרות עם זאת את עיצובו של זחל,

אף אם שונה, אף אם מעוות בצורה נוראה. השאלה הניצבת אז היא למצוא את האמצעי לברור מוטציות המשנות לא את חומרי הבנייה של הזבוב, אלא את המרכיבים הקובעים את מקומם ומגדירים את צורתו של היצור.

פעולתם של הגנים ההוֹמֵאוֹטיים מתבטאת בהסדרת פעולתם של גנים אחרים. אלה הגנים הקובעים את ייצור גורמי הגדילה ואת קולטניהם, ואשר בפעילותם מווסתים את הִתרַבּוּת התאים ואת פעולות הגומלין שלהם. מה שקובע את התפתחות הזבוב הוא אפוא מדרג מסודר של רכיבים גנטיים. במדרג זה, הגנים ההוֹמֵאוֹטיים והגנים המושפעים מהם מייצגים דרגות מסוימות אשר אנטוניו גרסיה-בלידו (Antonio Garcia-Bellido) מכנה גנים "בוררים" וגנים "מפעילים".

אין לנו עדיין אלא ידיעות מעורפלות על הדרך שבה מתארגנים המבנים המורכבים יותר של בעלי-החיים. בעיקר איננו יודעים את הדרך שבה הגוף ואבריו מקבלים את גודלם ואת צורתם, כלומר את התהליכים המסדירים את הִתרבות התאים ואת עיצוב צורותיהם. סביר ביותר להניח כי המידע לכך נמצא בכל תא ותא; וזאת משום שההתנהגות המתוכנתת גנטית של התאים קובעת את הארגון העל-תאי. ככל הנראה, ארגון הגוף בקוויו הגדולים הוא תוצאה של פעילויות גומלין מקומיות בין קבוצות תאים.

מובן כי מבנה העובר אינו צץ יש מאין. הגנים של האם הם המכוונים אותו ומציבים אותו במקומו. ייצורו של זבוב מתחיל אצל האם, כאשר היא מתחילה להכין את הביצית. בביצית זו מצויים חומרי הבניין – חלבונים, שומנים, סוכרים, מִיטוֹכוֹנדרִיָה וגרעין התא, שבו רשומות ההנחיות הנדרשות כדי ליצור זבוב. פרט לכך חייב להימצא בביצית "משהו" המאפשר לארגן את כל החומר הזה; לחלק אותו במרחב כדי להכין את הופעת האברים; להתוות את הצורה של האורגניזם העתידי; לסמן לתאים העתידים להיוולד את המקום והתפקיד שיהיו להם; בקיצור להקנות צורה לחומר. אותו "משהו", אותו "מידע מיקומי", מתניע את הגנים שבגרעין, שמחציתם מקורה באב ומחציתם מקורה באם. פעולת גומלין זו, תהליך זה של עיצוב צורה, הם הגורמים לכך שזבוב הוא זבוב ופיל הוא פיל. מידע זה על המיקום, מידע המצוי כבר בביצית, בהכרח נקבע שם על ידי האם בעת יצירת הביצית. הוא חייב אפוא להיות תלוי בגנים, לא של העובר אלא של האם. רק לאחר שהמערכת מותנעת יפעלו הגנים של העובר וישפיעו בתורם.

מעניין לציין כי הציר הקדמי-אחורי, שהאם תורמת לעובר, זהה לזה של האם עצמה. במלים אחרות, מאז יש זבובים והם מתרבים, הם מנציחים בשקדנות באותו כיוון את אותו הציר הקדמי-אחורי. מובן שגם הוא אינו בא מן האין. הוא בא מאורגניזם אחר שזבוב הפירות הוא צאצאו במהלך האבולוציה.

בספרות, הזבוב הוא חרק מוכּר; סמל של המגוחך והמעצבן. פחות דוחה מן העכביש, פחות מושך מן הפרפר, הוא מגלם את חסר-המנוחה, את הנלעג וחסר-התועלת. גרוע מזה, הוא מסיח את הדעת. בעבור מונטיין (Montaigne), זמזומו "רוצח" את התרוממות הרוח. בעבור פסקל (Pascal), הוא "מכביד על התבונה". יתר על כן, נטייתו אל האשפה, הריקבון והגללים, הפכוהו ליצור מאוס.

והנה, רק במדע הצליח הזבוב להפוך לכוכב. לא רק בגנטיקה, אלא גם באמבריולוגיה, וגם כאן בדרך בלתי-צפויה לחלוטין. האמבריולוגיה נותרה במשך זמן רב שטח ממודר; אפשר כמעט לומר, תחום המנוהל על יד חבורות שבטים, שכל אחד מהם מסור לאורגניזם החביב עליו. עובר של קיפוד-ים אינו דומה לזה של צפרדע, של עכבר או של זבוב. ההתפתחות של כל אחד מהם נראית כנובעת ממנגנונים אשר מלכתחילה אין להם דבר עם אלה של האחרים. אך לאחר שהובנו מהלכיה הכלליים של ההתפתחות העוברית של הזבוב וזוהו הגנים הפועלים, היה זה מדהים להיווכח כי

אותם גנים ממלאים תפקידים דומים באורגניזמים מגוונים ביותר. ההתפתחות של כל העוברים נראתה כאילו היא נשלטת על ידי עקרונות משותפים. הזבוב הפך אז למעין דגם מועדף. היום, אם ניתן להתקדם בחקר העכבר והאדם, הרי זה הודות לזבוב.

פרק שלישי – העכבר

במהלך המאה העשרים גדל מאוד מספרם של המחברים החתומים על מאמרי מחקר בביולוגיה. לפני מלחמת העולם השנייה היה כל חיבור כזה לרוב פרי יצירתו של מדען יחיד. לאחר המלחמה מוצאים בדרך כלל שניים לכל חיבור. החל משנות השבעים גדל מספר זה בהדרגה עד שהגיע בשנים האחרונות לכמה עשרות ואפילו מאה בעבודות על הגנום.

בראשיתה של הביולוגיה המולקולרית, באמצע המאה העשרים, בוצעו רוב המחקרים על ידי צוותים של שניים, זוגות. אפשר להזכיר, לדוגמא, את עבודותיהם של ג׳ורג׳ בידל ואדוארד טאטום (Edward Tatum), סלבדור לוריא (Salvadore Luria) ומקס דלברוק (Max Delbrück), מקס פרוץ (Max Perutz) וג׳ון קנדריו (John Kendrew), ג׳יימס ווטסון (James Watson) ופרנסיס קריק (Francis Crick), ז׳אק מונו ואנוכי, מתיו מסלסון (Matthew Meselson) ופרנקלין סטאל (Franklin Stahl) ועוד. החיבורים החתומים על ידי כל אחד מהצמדים הללו מתווים שלבים רבי חשיבות בהתפתחות הביולוגיה המולקולרית. מדוע מילאו אז הצמדים תפקיד כה חשוב? מדוע היו תקופה זו ותחום זה כה הולמים לשותפות בין מדענים? האם היה זה בגלל האופי הבין-תחומי של מחקר זה? או בגלל מגוון הטכניקות, שמקורן בתחומים שונים, שהופעלו במחקרים אלה? או בגלל מורכבות הניסויים?

כל זה נראה לי לא כל כך סביר. הרבה יותר מאשר הצד הניסויי, דומני כי בעיקר ההיבט התיאורטי הוא אשר אִפשר לצמדים לפתח את כשרונותיהם ולהוכיח את יעילותם. כאשר מדע מצוי בראשיתו, והנוף פתוח ופרטיו טרם התבררו, יש ההזדמנויות רבות לדמיין תיאוריות ולבנות מודלים. וכדי לתכן תיאוריות ולבנות דגמים, טובים השניים מן האחד. המונולוג הפנימי מתאים פחות לתרגיל זה מאשר הדו-שיח של שני מוחות הרגילים לשתף פעולה, להתווכח, לבקר זה את זה, לעמת שתי דרכים שונות של התבוננות בעולם; בקיצור, לעבוד יחדיו או אחד מול השני. שלא לדבר על הצד המשעשע של המחקר, שהרבה יותר מענג לחוותו בשניים מאשר לבד. כי בשניים פורצים הרעיונות יותר מהר. הם מנתרים אל בן הזוג וניתזים ממנו. הם משתרגים אלה באלה כמו ענפי העץ. והאשליות נחנקות מהר יותר בעודן באיבן.

לאמיתו של דבר, בשניים העבודה תופסת די מהר מסלול שונה. היא נוהגת לפי כללים המיוחדים לשני השותפים ולמערכת הנוצרת ביניהם. כמו תאומים, הם משתמשים באוצר מלים מיוחד, ממציאים מלים חדשות. לעתים קרובות, בעת ויכוח ער במיוחד, כאשר הדו-שיח מואץ עד שהוא דומה למשחק פינג-פונג, עשויה ההתרגשות להגיע לדרגה כזו שכל אחד מהשותפים מתחיל להשיב עוד בטרם השלים השני את דבריו. כך שעד מהרה יימצא כל זר שייקלע לתמונה בלתי מסוגל לעקוב אחר הוויכוח.

במכון פסטר היה לי המזל להשתתף פעמיים בעבודה בצמדים כאלה. עם אלי וולמן (Elie Wollman) תחילה, כדי לחקור את הליזוגניות (היכולת של הנגיף לגרום להרס תאי הפונדקאי) ואת מיניות החיידקים. אחר כך עם ז׳אק מונו כדי לנתח את הסינתזה המושרית של החלבונים אצל חיידק הקולי (הכוונה היא לתהליך שבו גורמים לחיידקים להתחיל לייצר חלבונים בהשפעת

חומר מסוים המוכנס לתוכם. בניסויים כאלה גילו ז׳קוב ומונו לראשונה איך הדנ״א מכוון ושולט בתהליכים המתרחשים בתאים). לואיס תומאס (Lewis Thomas) הציע למדוד את מידת העניין של עבודה לפי שיעור ההפתעה שהיא גורמת. ובכן, במכון פסטר לא חסרו הפתעות! עם וולמן, האינדוקציה, הקרויה ארוטית, של התפתחות הפרופאז׳ במהלך ההזדווגות; המשגל הנסוג של החיידקים, כאשר בעת ההזדווגות שמים אותן במערבל רגיל של מטבח; המעגליות של כרומוזום החיידק. עם מונו, הניסויים הקרויים PaJaMo, שעליהם סיפרתי בספרי **הפסל הפנימי** (PaJaMo הוא קיצור שלושת השמות: Pardee, Jacob, Monod. מדובר בעבודה על חקר הוויסות של סינתזת החלבונים, עבודה שהוכיחה כי עיכוב – או דיכוי – הוא המכניזם הבסיסי); ובעיקר שורה שלמה של מוטציות, שכמה מהן היו לחלוטין בלתי-צפויות, כגון המוטציות הדומיננטיות השליליות (במוטציות דומיננטיות שליליות חסר האזור בדנ״א המסוגל לאתחל שעתוק של גנים ליצירת בקטריופאגים. במוטנטים כאלה, סילוק של הדכאן לא מוביל לייצור פאג׳ים), שבודדו בטבעות המווסתות של הבקטריופאז׳ לַמבְּדָה (Lambda) או של מערכת הלַקטוֹז. הפתעה נוספת ציפתה לנו במהלך עבודה זו: לאחר שיצרנו מודל שאנו עצמנו התקשינו לקחת אותו ברצינות, הופתענו לגלות כי יש בו מידה של אמת; כי העולם, או לפחות שבריר של העולם, מאשר בצייתנות את מה שעלה בדמיוננו. לפחות זמנית!

במשך כמה וכמה שנים בילינו ז׳אק מונו ואני בכל יום שעות בחדר עבודתו, חלק מהזמן בוויכוח, חלק בשרטוט דגמים על הלוח. בהדרגה, הודות לצירוף העבודה על הליזוגניות ועל מערכת הלקטוז, מרוב ויכוחים ושרטוטים על הלוח, התבהר הדגם הנקרא ״אוֹפֶּרוֹן״ (Operon). דגם זה סיכם את מה שהיה ידוע על המנגנונים של סינתזת החלבון. הוא קידם את הרעיון בדבר יחידת ויסות המווסתת את התבטאות הגנים: לולאה הבנויה מחלבון מווסת וזה משפיע על קטע דנ״א המווסת בתורו את פעולתם של הגנים הסמוכים אליו.

הצענו דגם זה כדי להסביר את ויסות התבטאותם של הגנים בחיידקים. אולם תקוותנו היתה למצוא אצל האורגניזמים היותר מפותחים יחידות ויסות דומות, הפועלות לפי אותם עקרונות, כמובן, עם המורכבות הנדרשת; במיוחד בתופעות המהוות תשתית להתפתחות העובר ולהתמיינות התאים. אפשר היה לדמות יחידות ויסות אלה לרכיבים של מעגלים אלקטרוניים. ניתן היה לצרפן כאוות נפשנו, לחברן כדי להמריץ או לעכב את פעולת הגנים לפי תכניות שונות העונות על תפקודי ויסות מגוונים.

לאחר פרסומו זכה מודל זה של האופרון להצלחה מיידית וברורה; לעתים אפילו מוגזמת, שכן החילו אותו על כל מיני תפקודים, אף בתחומים שלא היה לו מה לעשות בהם. דגמים אחרים הוצעו כדי להסביר את ויסות התבטאות הגנים אצל החיידקים במנגנונים שונים, מהם שונים קיצונית מזה שלנו. הם הופרכו עד מהרה על ידי הביוכימאים. למרבה הצער לא אלה של מכון פסטר, אשר מעולם לא ניגשו אל הבעיה ברצינות הראויה ובאמצעים המתאימים. אלא על ידי אלה של הרווארד, ולטר ג׳ילברט (Walter Gilbert) ובֶּנו מילר-היל (Benno Müller-Hill), שהצליחו לבודד את המדכא של מערכת הלקטוז, וכן מארק פטשנה (Mark Ptashne), אשר ניקה את זה של בקטריופאז׳ הלַמבְּדָה. ואז התאפשר המחקר המולקולרי של הוויסות. הרכיבים שנתגלו היוו אכן יחידת ויסות אשר מאפייניה תאמו, תוך שינויים זעירים, את אלה שחזינו בדגם שלנו.

מה שעניין אותי מכאן ואילך היה לחקור באיזו מידה העקרונות שנתגלו בוויסות התבטאות הגנים אצל החיידקים פועלים גם אצל האורגניזמים המורכבים, בעיקר במהלך התפתחות העובר. ואם הם אכן פועלים כך, מהו מקור המורכבות הנוספת המצויה שם בהכרח – בעיה קשה במיוחד, שכן נראה היה אז כי לא בא בחשבון להחיל על האורגניזמים האלה את השיטות שבהן השתמשנו

בחקר החיידקים. במקרה של החיידקים, האיתור והניתוח של מרכיבי הוויסות הסתמכו כמעט לחלוטין על אנליזה גנטית של התא, אנליזה לא ישימה אז לגבי האורגניזמים הקרויים אֶאוּקַריוֹטיים (שהחומר התורשתי שלהם נמצא בתוך גרעין התא). פרט לשמרים, שהתאימו באופן מושלם לסוג זה של מחקר, אלא שלא היה להם דבר עם התפתחות העובר והתמיינות התאים, חוץ מכמה תופעות של יצירת נבגים ושל מיניות.

אם רציתי באמת לחקור את ההתמיינות, היה עלי לבחור בין שתי גישות. להמשיך במחקר החד-תאיים – חיידקים או שמרים – ולבחון תחומים חדשים. או, להפך, להתעניין בַּיותר גדול ויותר מורכב, מה שאמר חיפוש אחר חומר חדש. החלטה קשה. רוב המדענים, בעיקר הביולוגים, משהתחילו סוג של מחקר בחומר נתון, אינם מחליפים אותו לעולם. הם מעבירים כך את חייהם בהצלחה קטנה או גדולה, לפי כישורי ההמצאה שלהם. נדירים הם אלה, כמו אנדרה לבוף (Lwoff), שהחליפו מספר פעמים במהלך עבודתם את תחום המחקר וגם את האורגניזם, כשהם מביאים בכל פעם רוח חדשה לטיפול בבעיה ישנה.

בשאלה זו של חומר המחקר והשינוי, הייתי צריך, כמובן, לדון עם ז׳אק מונו. מאז העבודה על האוֹפֶּרוֹן, מאז שנכשלנו בניסיון לבודד את הדכאן במכון פסטר, התפצלו אט אט שטחי ההתעניינות שלנו. ז׳אק התמסר בעיקר למחקר האפיונים של חלבונים וַסֻּתִים מסוימים, אשר תכונותיהם – שנקראו אַלוֹסטֶריוֹת (המונח ״אַלוֹסטֶרי״ מציין קבוצה של אנזימים אשר שינוי בצורתם המרחבית גורר שינוי בתפקודם) – נחשפו בעבודתו של ז׳אן-פיאר שנז׳ה (Jean-Pierre Changeux). בתחילה השתתפתי בעבודה זו, כאשר התברר כי לחלבונים של לולאות הוויסות, המדכאים או המפעילים, היו תכונות אלוסטריות. זו היתה בין השאר אחת הדרכים היחידות להסביר את אופיים של כמה מהמוטנטים החביבים עליי, כגון המוטנטים השליליים הדומיננטיים. אולם עיבוד הדגמים ובחינתם התבססו קודם כל על מחקרים קינֶטיים מפורטים של הריאקציות הכימיות שזורזו על ידי אנזימים אלה. ולא מצאתי במחקרים קינטיים אלה שום היבט מעורר תשוקה.

אשר לי, אני התרכזתי בחקר החלוקה התא ושכפול הדנ״א בחיידק אֶשֶׁריכיה קולי. ב-1962 באה משפחת ברנר (Brenner) לבלות חופשה עם משפחת ז׳קוב על חוף ים בוונדה (Vendée), היושבת לחוף הים, שסידני כינה אותה הפֶּלח (The Slice). בעוד הילדים משחקים על החוף, יצרנו אנו, סידני ואנוכי, תוך שיחה ושרטוט על החול, דגם שנקרא רֶפְּליקוֹן, שאִפשר לקשר את חלוקת התא עם שכפול הדנ״א. הרעיון היה להצמיד את הדנ״א אל הַמֶּמְבְּרָנָה בנקודה שתשלוט בשכפול. עלך סמך הדגם הזה ניסינו, עם פרנסוא קוזין (François Cuzin), לבודד ולנתח מוטנטים של החיידק א. קולי, אשר החלוקה ו/או השכפול השתבשו אצלם.

אבל השאלה החשובה לי היתה: האם כן או לא להחליף את החומר ואת נושא המחקר? ז׳אק ואני התווכחנו עדיין לעתים קרובות מאוד, אף אם לא עבדנו עוד בקשר כה הדוק כלפנים. שוב ושוב ניסיתי לנתב את השיחה בכיוון של שינוי אפשרי. אבל ז׳אק לא התעניין בזה כלל. הוא נשאר צמוד מאוד אל מחקר המיקרו-אורגניזמים, שאותם העריך – בצדק – כחומר המועדף לחקר בעיות בלתי-פתורות רבות.

למרות זאת, לא שוכנעתי מנימוקיו מכמה סיבות, פחות או יותר טובות. ראשית, לא היה לי כל חשק לבלות את חיי בעשיית אותם ניסויים כל הזמן. למרות אמרתו השנונה של אלפרד הרשי (Alfred Hershey), אשר חשב כי בשביל הביולוג האושר פירושו להגשים ניסוי מסובך מאוד ולחזור עליו יום יום, תוך שינוי פרט אחד בכל פעם – אני רציתי משהו שונה. מזה חמש-עשרה

שנים בערך, הייתי שקוע בזיווג זוגות חיידקים שנבחרו בקפידה. סוג זה של ניסוי הביא לי סיפוק רב. אבל נראה לי שמיציתי את התענוג. הייתי אומנם מוכן להפוך למעין גורו בענייני סקס, אבל לא של החיידקים. כמו כן, החיידקים החלו להיראות לי חסרי-טעם, קצת נחבאים אל הכלים. רציתי משהו נראה לעין, עם הורמונים, עם ריגושים, עם נשמה. רציתי חיות שניתן להביט בהן בעין בלתי-מזוינת, להכירן כפרטים, אפילו לכנותן בשמות. שיכולות להביט אליך עין בעין. אבל הסיבה העיקרית לא היתה זו. היא היתה יותר רצינית, יותר ביולוגית, יותר מקצועית. אצל המיקרו-אורגניזמים ניתן היה למצוא תופעות שהזכירו התמיינות של תאים; אצל החיידקים, זו התופעה של יצירת נבגים; אצל השמרים – הקרובים מאוד לתאי האורגניזמים העילאיים – מוצאים גם יצירת נבגים וגם מיניות. אבל היה בזה קצת משום הונאה. אם רוצים לחקור את התפתחות העובר, צריך לעבוד על עוברים. אם רוצים לחקור את התמיינות התאים, צריך לעבוד על אורגניזמים שעברו התמיינות: תאי שריר, תאי עצב, תאי עור, תאי כליות וכו׳. אין טעם להתחמק: צריך לתקוף שם. החלטתי לשנות כיוון.

לאחר שנפלה החלטה זו (בערך בשנת 1967) ניצבו בפני שתי שאלות: באיזה אורגניזם לבחור? איך לעבור מסוג אחד של מחקר אל סוג אחר? בביולוגיה יש חשיבות רבה לבחירת האורגניזם הנחקר. ראשית, משום שעצם טבעו של יצור חי, המבנה והפיזיולוגיה שלו, מגבילים את אפשרויות המחקר לסוגים מסוימים של ניסויים. כמו כן משום שעם הזמן, וככל שנצבר ידע, אתה הופך למעין אסיר של מה שנעשה ושל מה שידוע. מצטברים והולכים ציוד וחומרים שונים, מוטנטים, אנזימים, מוצרים שנוקו, כולם בעלי ערך רב. ההתקשרות לנושא מחקר נתון ולחומר-אורגניזם-מוגדר משמעה גם השקעה של זמן ועבודה, ההולכת וגדלה מיום ליום. אם, לאחר בחירה בנושא מסוים, אתה חושש שטעית בבחירתך, שינוי הכיוון עלול להתגלות כעניין קשה.

כיצד לבחור מבין האורגניזמים החביבים על האמבריולוגים: קיפוד-ים, צפרדע, זבוב, עכבר ויוצא באלה? כל אחד מהם מתאים לסוג מסוים של ניסויים, אך אינו מתאים או מתאים רק במעט לסוגים אחרים. יום אחד לקחתי דף נייר כדי לרשום את כל התכונות שנראה לי כי רצוי שתמצאנה אצל היצור העשוי להתאים לסוג המחקר שרציתי להתחיל בו: קל לגידול, מתרבה במהירות, נוח לאנליזה גנטית, נוח להכנת תרבית תאים, נוח לחקירה פיזיולוגית וביוכימית ומתאים למחקרי התנהגות וכו׳. היה ברור כי בעל-החיים האידיאלי הזה אינו קיים. כדי לענות על דרישות אלה היה צורך בכלאיים של צפרדע, קיפוד-ים, זבוב וכו׳! היה הכרח אפוא להנמיך את הדרישות ולהתפשר.

בעת דיון במעבדה, הציע חוקר אחד להתעניין בפְּלָנָריות (סוג של תולעים בעלות מבנה גוף פשוט מאוד). יתרונן טמון בכושר ההתחדשות שלהן. כאשר חותכים פלנריה לשניים, כל חלק בונה מחדש את האחר ואז מקבלים שתי פלנריות שלמות עם כל הרקמות וכל האברים. כך ניתן אפוא לחקור את אופן בניית היצור ואת התמיינות התאים. נודע לנו כי המומחה הגדול של הפלנריות באירופה הוא איטלקי, פרופסור לזואולוגיה באוניברסיטה בצפון. יצאנו בשלושה לבקרו ולראות את בני טיפוחיו. היה זה אדם קטן, יובשני אבל חייכן, שחור עיניים ושער. כבר בתחילה הצהיר עד כמה לכבוד לו לראות ביולוגים מולקולריים מתעניינים ביצורים הצנועים שלו! לשאלתנו הראשונה: כמה זמן נדרש לפלנריה להתרבות, הוא השיב מיד: ״בערך שלושה חודשים.״ בראותו את פרצופינו המאוכזבים, הוסיף: ״אולי חודשיים וחצי.״ וכיוון שלא נראה שוויתור זה עודד אותנו, הסתכן והוסיף בניגון זמרני נפלא: ״אולי עשרה שבועות. איני יכול להציע משהו טוב מזה.״ מיואשים, התכוננו לחזור לפריז.

הפרופסור לזואולוגיה ביקש ממני אז לתת סמינר לסטודנטים. הסכמנו על הנושא (״שכפול של הדנ״א וחלוקת תאים בחיידקים״) ועל השעה: מחר באחת-עשרה. למחרת הגעתי אל

האוניברסיטה בעשר ושלושים. אבל השנה היתה 1968, ואני מוצא את הפרופסור לזואולוגיה שלי במצב של הלם. "הסטודנטים תפסו את האמפיתיאטרון מאז הלילה. לא תוכל לתת את הסמינר שלך." למרות זאת, הוא שולח את אחד מסגניו לשאת ולתת עם הסטודנטים. לבסוף, בחמישה לאחת-עשרה, הללו מסכימים שאתן את הסמינר שלי. באחת-עשרה בדיוק אנו נכנסים, הפרופסור לזואולוגיה ואנוכי, אל אמפיתיאטרון מלא עד להתפקע, פחות או יותר כמו הנידונים אל גוב האריות. ברגע שהפרופסור קם כדי להציג אותי, כל הסטודנטים מתחילים לצרוח. לבסוף הוא מתיישב. ההמולה נפסקת באחת. אני קם ובתוך דומיה מוחלטת אני מספר את סיפורי הקטן על המוטנטים של חיידקי הקולי שאינם מסוגלים לשכפל את הדנ"א שלהם.

לאחר שסיימתי, מחיאות כפיים. אחר כך פורצות שאלות מכל הכיוונים. "האם בודדת את האנזימים שנפגעו על ידי המוטציות? האם אתה חושב שהסטודנטים יוכלו לעשות מהפכה? כמה מוטציות שונות בודדת? מה אתה חושב על גישתו של הפרופסור לאנטומיה אל הסטודנטים?" לבסוף אנו מסכימים לקבץ את השאלות בקבוצות: תחילה המדעיות ואחר כך הפוליטיות. אני דן אפוא תחילה בכמה היבטים של הסמינר שלי. כאשר זה מסתיים, כל הפרופסורים שהשתתפו במפגש, לרבות המארח שלי, הפרופסור לזואולוגיה, קמים ויוצאים. אני נותר בודד אל מול האריות. סדרת שאלות שעליהן אני משיב איכשהו. שאלות מסוימות על המצב הכללי, על התפתחות החברה שלנו, על הצורך בשינוי פוליטי וכו׳. אחרות, יותר מפורטות, על המצב של אוניברסיטה זו, שאותה לא הכרתי אבל הרגשתי שאני מתחיל להכיר די מהר. הם זועמים בעיקר על הפרופסור לאנטומיה אשר, לדעתם, התנהג אליהם שלא כראוי. כל זה מתנהל יפה, עם מנה לא קטנה של הומור. לאחר שלוש שעות של ויכוח, עוצרים. כאשר אני יוצא, הסטודנטים קוראים בקצב: "זו רק ההתחלה. נמשיך במאבק." כשאני כבר בחוץ, אני נדהם למצוא את כל הפקולטה מחכה לי לארוחת צהרים שעליה לא הודיעו לי מראש. כל הפרופסורים עטים עליי. איך זה עבר? אילו שאלות הציגו לך? מה הם רוצים? ואז אני מופתע לשמוע כי מזה שלושה חודשים הפרופסורים של אוניברסיטה זו לא דיברו עם הסטודנטים שלהם! כך הסתיים סיפור הפלנריה.

באותה תקופה הייתי בניו-יורק בכנס עם סיימור בֶּנצר (Seymour Benzer) וסידני ברנר (Sydney Brenner). ערב אחד, לפני ארוחת הערב, הלכנו לקולנוע לראות את הסרט העכבר ששאג (The Mouse that Roared). הסרט מספר על ארץ אירופית קטנטונת ביותר הנשלטת על ידי דוכסית גדולה. בישיבת מועצת השרים המוקדשת למצב הכספי האסוני של הארץ, מעיר אחד השרים כי הארצות היחידות שמצבן הכספי פורח הן השתיים שנוצחו במלחמה, גרמניה ויפן. ראש הממשלה מציע להכריז מלחמה על ארצות-הברית. ההצעה המתקבלת בהתלהבות. כוח צבאי של שישה אנשים בפיקודו של סמל נשלח אז ללחום בארצות-הברית. מסתבר כי היום שבו המשלחת הצבאית נוחתת בניו-יורק הוא יום העצמאות. העיר שוממה. אין איש. אף לא מכונית. הכוח נוחת וכובש את העיר בלי ירייה אחת. האפקט הקומי מוגבר על ידי משחקו של השחקן הבריטי פיטר סֶלֶרס המשחק את כל התפקידים: הדוכסית הגדולה, ראש הממשלה, הסמל וכו׳.

לאחר הסרט, ארוחת ערב. שם החל ויכוח רציני. סיימור וסידני כבר חצו את הקווים. שניהם זנחו מזה כמה חודשים את הבקטריופאז׳ים והחיידקים. לשניהם היתה תוכנית לחקור את מארג הקשרים של מערכת העצבים באמצעות מוטנטים שנבחרו בתחכום רב, סיימור בזבוב התסיסה וסידני בנֶמָטוֹדָה (תולעת דמוית חוט) קטנה, Caenorhabditis elegans. כל אחד שיבח את החומר שלו, שהוא כמובן יותר טוב מזה של האחר. לזבוב כבר היה עבר מדעי ארוך, שכן הוא היה במשך זמן רב האובייקט המועדף על הגנטיקאים. התרבותו מהירה וקל לגדלו במעבדה, שבה בקבוק פשוט יכול להכיל מאות כמותו. ובעיקר, היה קיים כבר אוסף של מוטנטים מגוונים מאוד, לרבות

כאלה שהשתבשה אצלם התפתחות העובר. כלומר, חומר מתאים מאוד למחקר גנטי של ההתפתחות. עם זאת, היו להם כמה מגרעות: הפיזיולוגיה שלהם קשה לחקירה, וכמעט לא ניתן להכין תרביות מהתאים שלהם.

הנמטודה הקטנה של סידני הציגה תמונה שונה. עד אז שימשה רק מעט מאוד כחיית ניסוי, ויתרונה העיקרי היה טמון ביכולתה להתרבות במהירות בצלחת תרבית, על מצע מאוכלס בחיידקי קולי. זו הייתה תולעת קטנה עגולה, באורך של חצי סנטימטר, והרמאפרודיטית (בעלת אברי מין זכריים ונקביים). כל פרט העמיד כמאה צאצאים תוך שלושה או ארבעה ימים. יצור זה, שהתרבותו פשוטה מאוד, התאים היטב לאנליזה גנטית. סידני כבר בודד סדרה של מוטנטים. היתה לה תכונה מפתיעה: תולעת קטנה זו הייתה מורכבת רק מ-982 תאים, שגורלו של כל אחד מהם נקבע בדייקנות. היא קלה לשימוש במחקר ביוכימי, אך היא לא התאימה למחקר פיזיולוגי. גם כאן, לא ניתן להכין שום תרבית של תאים. בסופו של דבר, שתי המערכות היו טובות באותה מידה. לאחת היה יתרון של וֶתק, ואילו לאחרת, המהירות.

כדי להחליק ממחקר אחד לאחר, היה צורך להכשיר לדרך החדשה חוקרים, חומרים ומעבדה. נראה לי אפשרי לעשות צעד ראשון בכיוון זה ולהכיר את תאי היונקים על ידי טיפוח תרביות תאים של עכבר. תפנית מעין זו נעשתה בקלות על ידי אנדרה לבוף כאשר החליף את הבקטריופאז׳ בנגיף של שיתוק ילדים כנושא למחקר. יתר על כן, בוריס אפרוסי בצרפת והנרי האריס (Henri Harris) באנגליה השתדלו לחקור את התמיינות התאים בתרביות של תאים. הם "איחו" תאים שהתמיינו מסוגים שונים ובחנו את התבטאותן של תכונות שונות בתוצרים. גם כאן נראה לי סוג זה של ניסוי קצת כהונאה, כדרך להימנע מלעסוק בעוברים. אך זו היתה התחלה.

ניתן היה בהוצאות מעטות להפוך את מעבדת החיידקים למעבדה של תרביות תאים. אמריקני אחד, דוד שוברט (David Schubert), בא לבלות שבתון של שנתיים והביא תאי נוירובְּלַסטומה (תאים מגידול סרטני של מערכת העצבים) של עכבר. אחר כך ביקשה הדוויג ז׳קוב (Hedwig Jakob), עמיתת מחקר של אפרוסי ב-Gif, לבוא לגור בפאריס. היא היתה "מגדלת תאים" מנוסה, בקיאה בכל הטכניקות. במשך כמה חודשים טיפחנו כמה סוגי תאים, בעיקר לימפוציטים של עכבר, כשאנו משתדלים לשמר היבטים מסוימים של ההתמיינות. לשם כך בחרנו תאים המסוגלים לסַנתֵז אנזים מסוים, שלאחר ההתמיינות שלהם הם אינם מסוגלים לייצרו. זה היה ניסוי שלא הניב ממש תוצאות. חשבנו במעומעם לאחות לימפוציט המסנתז נוגדן עם אחר שאינו מסנתז אותו, כאשר נודע לנו על התגלית של סזר מילשטיין (César Milstein) וג׳ורג׳ קהלר (Georges Köhler). הם גילו את הנוגדנים המונוקלונָלים ("צאצאי" גן יחיד)!

כל זה לא היה אלא שעשוע בציפייה לקפוץ למים עם עובר. במעבדה הקטנטונת שבה עבדתי, שאותה היה קשה לעצב מחדש, לא ניתן היה לעסוק אלא באורגניזם שגם הוא קטנטן. זבוב או נמטודה? במשך כמה חודשים שיחקתי עם תרבית הנמטודה שנתן לי סידני. עם פרנסואז דה ויטרי (Françoise de Vitry) והדוויג ז׳קוב יצרנו כמה מוטנטים. בסיוען יכולנו להתנסות בגנטיקה ובביוכימיה. אבל תולעת קטנה זו לא הלהיבה אותי כלל. לאחר שישה חודשים העברתי במכון פסטר סמינר על הנושא "מה לא ניתן לעשות עם הנמטודה."

זבוב התסיסה משך אותי יותר. בגלל המגוון העצום של מוטנטים שנצברו במשך יותר מחמישים שנה, מוטנטים אשר בכמה מהם השתבש ללא ספק מבנה היצור, כלומר התפתחות העובר. וגם בגלל ניסויים מסוימים שנעשו בשוויץ על ידי ארנסט הדוֹרן, אשר השתמש בבטן של זבוב בוגר בתור מבחנה לגידול תאים עובריים.

אבל במחשבה נוספת, האם היה זה הגיוני לעבוד על הזבוב במכון פסטר? נראה לי לא מתקבל על הדעת לעזוב את מכון פסטר ולעבור למרכז מחקר אחר. מכמה וכמה סיבות רציתי להמשיך במקום שבו התחלתי עשרים וחמש שנים קודם לכן. היתה לי בפרט הרגשה של מחויבות למכון פסטר ואנשיו, אשר קיבלו אותי כה יפה ואפשרו לי להמריא. אבל, לעומת זאת, העבודה במכון פסטר טמנה בחובה – כך נראה לי – אילוצים מסוימים. מכון פסטר נועד על ידי מייסדו לחקור את המחלות המידבקות ולהיאבק בהן, ומזה שבעים שנה התמסר לחקר החיידקים, הנגיפים ומנגנוני ההגנה. אם יכלה הביולוגיה המולקולרית להתפתח שם, היה זה דווקא משום שבראשיתה היא עסקה בחיידקים ובנגיפים. היה זה ודאי חסר-טעם לעבוד ישירות באותם תחומים אשר למענם נערכו, אם אפשר לומר כך, כל גייסות הקרב של מכון פסטר. אבל נראה חסר-תוחלת להכניס לשם חומר חדש הדורש את הלוגיסטיקה שלו.

מצד שני, כבר עבדו במכון פסטר – גם אם לדעתי במידה לא מספקת – על גידול של אורגניזם שעמד במרכז המחקרים שנעשו במכון: העכבר. יצור קטן זה התאים למחקר מערכת החיסון, אולם חוקרי החיסון השתמשו בארנבים. ניתן היה להדביק את העכברים בחיידקים או בנגיפים גורמי מחלות, אבל הבקטריולוגים חקרו בעיקר שרקנים (חזירוני-ים – Guinea pigs). לבסוף, זה היה בעל-החיים המתאים ביותר לחקר סוגים מסוימים של סרטן ולחקר השתלות. חוץ מזה, האנליזה הגנטית של העכבר החלה כבר בראשית המאה העשרים. הוא היה היונק שהתרבה הכי מהר. מוטציות רבות כבר היו ידועות. כמה מעבדות כבר עסקו בחקר העובר. ברור כי ניתוח התפתחותו של עובר שהושתל ברחם אֵם היה הרבה יותר מורכב ועורר קשיים רבים יותר מאשר אצל זבוב או אצל נמטודה, שלא לומר אצל צפרדע. אבל היו לעכבר שני יתרונות אשר באותה תקופה נראו לי מכריעים. ראשית, זה היה היונק הקטן ביותר; חיית המעבדה הדומה ביותר לאדם, שאפשר היה להשתמש בה במחקרים של גנטיקה, פיזיולוגיה ופתולוגיה אשר ישמשו כדגם למחקר האדם. שנית, וזה העיקר, הוא ענה על דרישות רוב התחומים שבהם עסק מכון פסטר. היה זה אפוא הגיוני לחלוטין לחקור שם בפרוטרוט את ההיבטים הגנטיים והעובריים שלו. מה שלא היה נכון לגבי האורגניזמים האחרים, כגון זבוב, נמטודה או צפרדע.

ככל שהרהרתי בנושא העכבר, הלכה והתחזקה אצלי ההכרה כי צריך לנקוט בדרך שהוכחה כיעילה כל כך לגבי החיידקים. בעיקר היה עלינו לכנס חוקרים משטחים שונים העובדים עם אותו אורגניזם, כלומר העכבר. באותה תקופה התוו בממשלה תכנית מתאר כללית למה שצפו כעתידה של צרפת בתחומים מגוונים ביותר, בצורה של "תכניות חומש". בסוף שנות השישים הכינו למשל את התכנית לשנים 1975-1971. הואיל והייתי בין המדענים שבהם נועצו, הצעתי להקים את "מכון העכבר" שבו יעבדו זה לצד זה על אותו בעל-חיים גנטיקאים, פיזיולוגים, ביוכימאים, פתולוגים, וירולוגים, חוקרי סרטן וכו'. הצעה זו זכתה לקבלת פנים קרירה – קודם כל מצד מְנַהלני המדע. שאלתם הראשונה היתה האם ארצה להיות מנהל המכון, מה שלא עניין אותי כלל. אילו הייתי מסכים לזה, ייתכן שהיו מקימים את המכון. אך בעיניהם מפעל בנייה כזה יכול לבוא בחשבון רק בשביל מישהו, לא בשביל תכנית מחקר! קבלת הפנים היתה גרועה גם בקרב רוב עמיתיי, אשר היפנו כנגדי שלוש טענות עיקריות: 1) הוא רוצה שיהיה לו מכון משלו כדי לנהל את כל הביולוגיה הצרפתית. הוא רודן. 2) זה רעיון טיפשי. יש להניח לאנשים לעבוד בנפרד לפי רצונם. 3) מדוע העכבר? מדוע לא מכון של קיפוד הים או הצפרדע? אילו רציתי לנהל מכון כזה ואילו הייתי נלחם די הצורך למען מפעל זה, קרוב לוודאי שהייתי מצליח. אולם הביקורות וההערות נראו לי כה אוויליות עד כי לא ניסיתי אפילו. כנראה טעיתי. הקמת מכון כזה באותה עת היתה בוודאי מעניקה יתרון רציני לצוותים הצרפתים.

כדי לעבוד עם העכברים היה צורך במקום. לא היה כל סיכוי לכך במבנה הישן של מכון פסטר, שבו החלה הביולוגיה המולקולרית. כדי לפתח את הביולוגיה החדשה עמדו לבנות בניין חדש. אבל הוא לא יהיה מוכן אלא בראשית שנות השבעים. בינתיים, המשכתי להתאמן בעבודה על תרביות תאי יונקים עם הדוויג ז׳קוב.

התלהבותי לחקר העכבר גברה עוד יותר כאשר נודע לי כי קיים באורגניזם זה גידול בעל תכונות יוצאות דופן: סרטן הנקרא teratocarcinoma, המצוי באשכים של שושלות עכברים מסוימות שמוצאם מהכלאות אחים-אחיות (שושלות inbred). אפשר להשתיל גידולים אלה בשרשרת, מעכבר לעכבר. הגידולים מכילים תאים לאחר התמיינות מרקמות מגוונות ביותר, ביניהם תאי שריר, תאי עצב, תאי בלוטה, תאי לב וכו׳. לצידם נמצא גם סוג תאים שלא התמיינו, הדומים לתאים של עובר צעיר. כמה מעבדות, ביניהן זו של בוריס אפרוסי, הצליחו לבודד את התאים מהטיפוס העוברי ולשמור עליהם במבחנות. כאשר גודלו אלה במשך כמה חודשים ואז הוזרקו מחדש לעכברים, נותרה בהם היכולת להשרות הופעת גידולים שהכילו סוגי תאים מגוונים ביותר. נוסף לכך היו סימנים שעוררו את המחשבה כי תאים אלה מסוגלים אפילו להתמיין במבחנות. גידולים אלה נראו לי על כן כמעוררים עניין בלתי רגיל. ראשית, היתה כאן סבירות גבוהה שיהיה אפשר לחקור את התמיינות התאים אצל העובר בה-בעת במבחנה ובגוף החי. שנית, היתה זו הזדמנות לחקור את הקשר, אשר מזה זמן חשבתי שהוא קשר הדוק, בין עוברים לסרטן. היה זה ההסבר היחיד שיכולתי למצוא לעובדה שלעתים קרובות הופיעו בסרטן מולקולות חלבונים שלא נמצאו אצל אורגניזמים בוגרים. כיוון שמולקולות כאלה לא יכלו סתם כך ליפול משמים, הן היו חייבות להגיע מגנים שפעלו בשלבים מסוימים של התפתחות העובר, ולא התבטאו בבוגר. התהליך הסרטני, קרוב לוודאי גרם לשיבוש מערכות ויסות מסוימות הפועלות בעת התפתחות העובר. ייתכן שהטֶרָטוֹמה (teratoma – סוג של סרטן הכולל תאים שמקורם ברקמות עובריות. טרטוקרצינומה – אחד מבין סוגים שונים של טרטומה) או יותר נכון, הטרטוקרצינומה (teratocarcinoma) של העכברים תאפשר לנו לפענח את הקשר הזה.

אם כן, העכבר. העובר והתאים. בסוף שנות השישים נפלו ההחלטות. עם זאת, היה הכרח לחכות שתסתיים בנייתו של הבניין שנועד לביולוגיה מולקולרית במכון פסטר. חוץ מזה, שני תנאים היו חייבים להתמלא כדי להפעיל את המערכת. ראשית, היה צורך להתאים ככל האפשר את הבניין העתידי לעבודה עם עכברים. הבניין נועד לצוותי הביולוגיה המולקולרית, כלומר לצוותים שיצאו ממעבדותיהם של אנדרה לבוף, של ז׳אק מונו ושלי. כל אלה עבדו עד אז על חיידקים. פרט לקבוצה שהחלה לחקור את נגיף הפּוֹלִיוֹמָה ואת התרבותו בתאים של בעלי-חיים, איש לא דיבר עדיין על מעבר מהחיידקים אל אורגניזם מורכב יותר. אבל היה ברור שמחקר העכברים עמד לדרוש מסה קריטית מסוימת. התחלתי אפוא לעשות קצת תעמולה לטובת העכברים, ובסתר לבי קיוויתי לשכנע קבוצות אחרות במספר מספיק כדי להקים בתוך הבניין החדש מעין מכון העכבר בזעיר אנפין.

פעמים אחדות דנתי בשאלות אלה עם ז׳אק מונו. הוא לא היה עדיין מנהל מכון פסטר, אך היה ברור לכול כי הוא עומד להיות המנהל. למעשה, מינויו התעכב במשך כמה חודשים מסיבה מפתיעה: התנגדותו של הנשיא פומפידו. בערב שבו קיבלנו את פרס נובל (פרנסואה ז׳קוב, אנדרה לבוף וז׳ק מונו התחלקו בפרס נובל לפיזיולוגיה ורפואה לשנת 1965 על מחקרם בגנטיקה, ובעיקר על דגם האופרון, המהווה הסבר לוויסות התבטאותם של הגנים) העניק ז׳אק ראיון לז׳אן דניאל בשביל ה״נובל אובסרווטר״. הוא ביקר בראיון את המדיניות המדעית של הממשלה, המונהגת על

ידי ז׳ורז׳ פומפידו, והצהיר כי הלה אינו מתעניין כלל במדע. פומפידו, אשר כמו כל נשיאי הרפובליקה היה בעל זיכרון של פיל ונטירת-איבה של קרנף, לא סלח לז׳אק את ההערה הזו. במשך כמה חודשים הוא התנגד למינויו כמנהל – גישה מפתיעה, ראשית משום שלפי התקנון אין לנשיא הרפובליקה דבר עם מינוי מנהל המכון וגם משום שהזיכרון הזה היה סלקטיבי, כי פומפידו שכח הערה של דה גול. יום אחד בישיבת הממשלה הציע שר אחד לעשות כמה שינויים בקולז׳-דה-פראנס וזכה להערה הבאה מפי הגנרל: ״יש שלושה דברים בצרפת שאין לגעת בהם: הקולז׳ דה פראנס, מכון פסטר ומגדל אייפל״.

מונו לא היה נלהב ביותר לרעיון שאעבור מן החיידקים אל העכברים. הוא חשב, ובצדק, כי נותר עוד הרבה לעשות כדי להבין טוב יותר את התפקוד והגנטיקה של תאי החיידקים. נראה לו חבל לפרק בבת-אחת צוותים, ששיתוף הפעולה שלהם התברר כיעיל. והוא הוסיף, בהגיון כמו תמיד: ״אתה עומד להחליש את הצוותים הישנים ולמצוא את עצמך מבודד בעולם שאותו אתה בקושי מכיר או אינך מכיר כלל.״ בסופו של דבר, לאחר כמה ויכוחים, הוא השתכנע כי אין זה לחלוטין בלתי-סביר להתחיל לעסוק במערכות הוויסות של האורגניזמים העילאיים, ובעיקר בעכבר.

נותרה אז בעיה חשובה אחת שקיוויתי לפתור אתו, בעיה שהוסדרה כאשר ז׳אק נעשה מנהל מכון פסטר: משכן החיות. מכון פסטר היה אז דל ביותר מבחינה זו: מעט מקום, ציוד גרוע. בבניין של הביולוגיה המולקולרית, שהיה בתהליך בנייה, היה מתוכנן במרתף בית-חיות גדול. השאלה היתה: אילו חיות יהיו שם? בעיניי, המחקר שתוכנן להיעשות בעכברים עתיד היה לחייב החזקת שושלות אחדות של עכברים מוכלאים בינם-לבין-עצמם, כמו גם בידוד וגידול מוטנטים, מיפוי מוטציות על ידי הכלאות וריבוי סדיר של עוברים; בקיצור, היה עלינו לצפות לגידול של עשרות אלפי חיות. המשתמשים העיקריים בבעלי-חיים במכון באותה תקופה היו האימונולוגים, עם הארנב כחיה המועדפת. אימונולוגים אלה – ובעיקר העומד בראשם ז׳אק אוּדֶן (Jacques Oudin), אשר עשה עבודה מעולה על התכונות האימונולוגיות ועל מבנה הנוגדנים – רצו, מדרך הטבע, לאכסן את הארנבים שלהם בבית-החיות של הביולוגיה המולקולרית, ובכך למלאו כמעט. כאן החל סכסוך: ארנבים! עכברים! באילו אחוזים? לדעת ז׳אק אודן, היה צריך לאכסן שם את כל הארנבים של המכון. לדעתי, צבא של עכברים. היו לנו ויכוחים רבים וכמה הרמות קול.

למרבה המזל, עבודתו של ז׳אק אודן שכנעה אותו כי הגנים קשורים ישירות לסינתזה של הנוגדנים. כיוון שלא היה קיים מחקר גנטי של ארנבים, הוא הסכים בהדרגה כי עכברים עשויים להתאים יותר למחקרים הגנטיים מאשר ארנבים. בסופו של חשבון, מונו, לאחר שנעשה מנהל, פסק לטובת העכבר. וטרינר צעיר, ז׳אן-לואי גֶנֶה (Jean-Louis Guénet), שבא מן ה-CEA (המרכז לאנרגיה אטומית), גויס כדי לנהל את בית-החיות הזה. בהיותו בעצמו פעיל מאוד, ומעוניין מאוד במחקר הגנטי של העכברים, הוא הפך את בית-החיות שלו למכשיר מצוין.

נותר קושי אחרון. בקבוצה שלנו, שהתמחתה במחקר גנטי של חיידקים, הסכימו כולם לעשות את הקפיצה ולחקור עוברי עכברים. אבל לאיש לא היה ניסיון, לא באמבריולוגיה ולא בעכברים. היה על כולנו אפוא ללמוד קודם את הנושא. מצד אחד, שני חוקרים שעבדו אתי מזה זמן רב, שרל בבינה (Babinet) והיבר קונדמין (Condamine), יצאו להשתלמות, האחד באנגליה והשני בארצות-הברית, במעבדה המתמחה במחקר התפתחות העובר של העכברים. מצד שני, הצטרף אלינו רובֶר פוֹב (Robert Fauve), תלמיד לשעבר של רנה דיבוס (René Dubos) בניו-יורק, שתרם את בקיאותו בגידול עכברים ובפתופיזיולוגיה שלהם.

כך התהווה לאט לאט צוות חדש. וכאשר הבניין החדש היה מוכן לשימוש, בינואר 1972, כל ההמון הזה ניגש באומץ לחקור את הטרטוקרצינומה של עוברי עכברים. חיים חדשים החלו. והם החלו באותו זמן שבו ההנדסה הגנטית חוללה שינויים במחקר האורגניזמים העילאיים. מה שעמד לערער מן היסוד את התמונה שלנו על עולם החי.

פרק רביעי – משחק ההרכבה [הַמֶּכָּנוֹ]

בין גיבורי המיתולוגיה היוונית תפס דדלוס מקום מיוחד. הואיל והיה בעת ובעונה אחת נפח, אדריכל, פסל ומהנדס, הוא היה מסוגל לעבוד בברזל כמו גם בעץ. והואיל והיה צאצא של בית המלכות של אתונה, הוא למד את אומנותו אישית מאֲתֶנָה. דדלוס ייחס לעצמו כמה המצאות, אבל רבים באתונה ערערו על כך. בבית המלאכה שלו היה לו שוליה, טאלוס, אשר היה גם אחיינו. אף כי היה רק בן שתים-עשרה, כבר עלה השוליה על רבו בכושר המצאה ובתבונת כפיים. יום אחד מצא טאלוס לסת של נחש, ונוכח לדעת כי יוכל להשתמש בה כדי לנסר מקל. הוא יצר מעין לסת עם שִׁנֵּי ברזל: טאלוס המציא את המשור. המצאה זו, בנוסף לאחרות, כמו גלגל-הקדרים או המחוגה לשרטוט מעגלים, זיכתה אותו, למרות צעירותו, במוניטין יוצאי דופן. דדלוס טען כי הוא עצמו יצר את המשור הראשון. הקנאה טרפה אותו עד מהרה. יום אחד, בתירוץ שהוא רוצה להראות לו פרט מסוים באדריכלות, הוא העלה את טאלוס על גג מקדש ודחפו אל התהום. כאשר הואשם ברצח, הוא ברח ומצא מקלט בכרתים.

בקנוסוס לא הכירו אלא את דדלוס "המבריק" ואת כישוריו כאומן יוצא מגדר הרגיל. הוא נתקבל אפוא בזרועות פתוחות על ידי המלך מינוס אשר העמיד לרשותו אמצעים לטיפוח כשרונותיו. מוזר כי דדלוס לא העמיד את אומנותו לשירות שום אידיאולוגיה או שאפתנות אישית. למעשה, הוא סייע לאחרים להגשים תוכניות מטורפות ביותר. וכך, יום אחד, ביקשה את עזרתו אשתו של מינוס, פָּסִיפָאָה. היא התאהבה עד לשיגעון בשור לבן נהדר שנשלח על ידי פוסידון כדי לנקום במינוס על אשר הֵפֵר שבועה. היא התחננה לפני דדלוס שיתן לה אמצעים לספק את תשוקתה. מיד בנה דדלוס פרה מעץ, חלולה, מכוסה בעור של פרה אמיתית. אחר כך הוא הסביר לפסיפאה כיצד להשתמש בה: לפתוח את הפתח בגבה של הפרה ולהידחק אל תוכה בהחליקה את רגליה בתוך רגליה האחוריות של הפרה. לאחר מכן עזב דדלוס בשקט את המקום. פרסיפאה ביצעה את התחבולה. בו במקום בא שׁוֹרהּ החביב והזדווג עם הפרה. כמה חודשים לאחר מכן, בהתאם לגנטיקה של אותה תקופה, הביאה פסיפאה לעולם את המינוטאור, יצור בעל גוף אנוש וראש שור, הניזון מבשר אדם.

אחר כך נאלץ דדלוס לציית לדרישותיו של מינוס. המלך זעם על בגידותיה של אשתו וציווה על דדלוס לבנות כלא, אשר מסדרונותיו ייצרו רשת כה מסובכת, עד כי מי שייכנס לשם לעולם לא יוכל לצאת. במבוך הזה נכלא המינוטאור, שאליו הביא דדלוס, האחראי להזנתו, בכל חודש שבעה עלמים צעירים ושבע עלמות צעירות שהוסגרו על ידי העיר אתונה.

לאחר האב והאם, היתה זו הבת, אַרִיאַדְנֶה, אשר דדלוס נאלץ לספק את תשוקותיה. תֶּזֶאוּס [בנו של מלך אתונה] היה נחוש בדעתו להרוג את המינוטאור ולשחרר כך את אתונה מן המס הנורא, על כן הסתנן אל בין הנערים הצעירים אשר נמסרו למפלצת. למזלו ראתה אותו אריאדנה והתאהבה בו. היא התחננה לפני דדלוס שיעזור לתזאוס לצאת מן המבוך. מיד נרתם האדריכל לפעולה. הוא נתן לאריאדנה פקעת חוטים והוראות כיצד להשתמש בה. בהישארה ליד הפתח,

אריאדנה תחזיק בקצה של החוט בעוד תזאוס יחזיק בקצהו האחר בהתקדמו. תזאוס הרג את המינוטאור, ואז הלך בעקבות החוט והצליח לצאת ללא תקלות. ברוב זעמו על דדלוס, כלא אותו מינוס עם בנו איקרוס בתוך המבוך. ההמשך ידוע: כדי לברוח יצר דדלוס כנפיים מנוצות של צפורים והוא ובנו הדביקו אותן אל כתפיהם באמצעות דונג; למרות הפצרותיו של האב לבנו שלא יגביה לעוף נמוך, איקרוס – שיכור מיהירות, מכוח וממהירות, מבוסם מהאוויר ומהשמש – התרומם גבוה מדי, הדונג נמס בחום השמש, והוא נפל וטבע לעיני אביו, שהפעם נותר אין-אונים.

במיתוסים היווניים דדלוס לעולם אינו הדמות המרכזית, אלא דמות משנה. עם זאת, לעתים קרובות מילא תפקיד מכריע. הוא גילם את יכולתה של הטכנולוגיה להשיג שליטה על העולם. יש לו תשובה לכל הבעיות המעשיות. יום אחד ביקש ממנו ידיד לפתור בעיה קשה: להעביר חוט בקונכיה של שבלול. דדלוס פתר את הבעיה בו במקום. הוא חיבר חוט דק מאוד לנמלה. אחר כך נקב חור בקצה הקונכיה, ואת שפתי החור משח בדבש. עד מהרה רצה הנמלה בכל המהירות במעלה הקונכיה, הגיחה מבעד לחור ומיהרה לזלול את הדבש.

דדלוס היה טכנאי נהדר, אך לעולם לא היה אלא טכנאי המעמיד את אומנותו לשירות אדוניו. הוא עצמו לא שאף לשלטון. הוא לא ניסה לספק שאיפה או תשוקה. בניגוד לגיבורים שהזדמן לו לשרתם, אשר כדי להשיג את מטרתם לא היססו להפר כל חוק, דדלוס נשאר תמיד בגבולות הסדר והחוק. אין הוא נסחף לעולם על ידי מה שהיוונים מכנים היבריס (Hubris – גבהות-לב, התרסה כלפי שמים).

ההיבריס הוא היעדר חוש מידה, והוא גורר אי-סדר. הוא הלהיטות הקדחתנית המולידה מריבות ומבוכה. ההיבריס, אומר ז׳אן-פיאר וֶרנָאן (Vernant, Jean-Pierre – **Mythes et Pensées chez les Grecs**, Paris, Maspero, 1965), מוביל את בני האדם להתגרות באלים, להציב את עצמם מעל לחוקי האנוש. ההיבריס, למשל, הוא שדחף את פרומתיאוס, בעל כורחו, לקרוא תגר על זאוס. פרומתיאוס חתר להשיג עוצמה בעזרת הידע. כדי להשיג את מטרתו, כל תחבולה היתה כשרה. מאום מכל זה לא נמצא אצל דדלוס. הוא רוצה להיות מהנדס, והטוב במהנדסים. לשם כך לא היסס להרוג את מי שראה כיריבו. אך לא בעזרת ההיבריס הרג דדלוס את טאלוס. רצח זה הוא פעולתו של פושע קטן הרוצה לגנוב מן האחר את תגליתו, של עבריין התוקף מאחור בבוגדנות. אין כל מרד נגד האלים בפעולה זו, שום הפרה של חוקי האלים, שום ניסיון להפוך על פיהם את המדרגים, את הכללים ואת הערכים.

עם זאת, בעוד דדלוס מעולם לא איבד את הראש, לא נסחף אל ההגזמה, נזהר תמיד בכבודם של הרגשות המוסריים והדתיים המסדירים את חיי האדם לפי רצון האלים, והעמיד את עצמו לחלוטין לרשות האחרים. אומנותו איפשרה ללקוחותיו להיכנע להיבריס שלהם. הודות לדדלוס ולטכנולוגיה שלו יכלו פסיפאה, מינוס, תזאוס ואפילו איקרוס, להתמכר לשיגעונותיהם ולהגשים עד תום את תשוקותיהם. מבחינה זו מסמל דדלוס חולי של ימינו: הטכנולוג המרקיע שחקים, המעמיד את כשרונו לשירות אידיאולוגיות שונות מבלי לתהות על תוכנן או על איכותן. בדדלוס מגולם ״המדע ללא מצפון״.

בעיני היוונים היבריס היה הרוע. עולם הנתון לחסדי ההיבריס הוא עולם הפוך, עולם של תוהו ובוהו. עולם שבו הכוח לבדו קובע את החוק, שבו מופקרים האנשים לסבל ולאומללות ללא מצרים: מלה זו, היבריס, מלה יוונית עתיקה זו, אמר לואיס תומאס (Thomas, Lewis – **The Medusa and the Snail**, New York, the Viking Press, 1979, p. 65), היא אולי המבטאת באופן הטוב ביותר את הפחד, את החשש, אשר מזה כמה שנים ניכרים בדיעותיהם של אנשים

בקשר למדע ולמדענים. ההיבריס אין פירושו רק מה שנראה לרבים כהתגרות בלתי-נסבלת של המדענים. הוא כולל את כל אותם תוצרים של המדעים והטכנולוגיות אשר מאיימים בסוף המאה העשרים ותחילת המאה החדשה על עתיד כדור הארץ שלנו ויושביו: האנרגיה האטומית, של הפצצות כמו גם של תחנות הכוח; גודש התעשיות, הזיהום, אפקט החממה, חיפושי הנפט בקידוחים תת-ימיים; בקיצור, כל מה שנחשב כמקור להתדרדרותו של עולמנו.

במשך זמן רב התמקדה הביקורת הציבורית בפיזיקה ובטכנולוגיות שלה. כיוון שהביולוגיה נחשבה כגורם מסייע, אם לא מניע של הרפואה, נחסך הדבר ממנה. היא תרמה למאמצים שעשתה האנושות תמיד כדי לגבור על מחלות, כאבים ומצוקות. אך מזה כמה שנים מואשמת גם הביולוגיה באותה מידה כמו הפיזיקה והטכנולוגיות שלה. דעת הקהל מתנפלת על כל מה שהיא רואה כאחראי להתדרדרותו של העולם; על כל מה שהיא מעריכה כפרי שיגעונם של המדענים וההיבריס שלהם. לאותו שק של קלון מושלכים בערבוביה מציאות והזיות: שליטה על התנהגות האדם באמצעות הכימיה, השתלת אברים שונים, התפוצצות אוכלוסין עולמית, שיבוט של בני אדם וייצור של אישיות אחת באלפי עותקים מפיסת עור, ייצור תינוקות במבחנה, ובעיקר מניפולציות בגנים ויצירת מפלצות. עצם הרעיון שניתן לקחת גנים מאורגניזם ולהשתילם באחר הוא בלתי-נסבל בעיני רבים. מושג הדנ"א המצרף צירופים חדשים נקשר למסתורין ולעל-טבעי. הוא מעורר שוב את הפחד הקשור במשמעות החבויה במפלצות, הדחייה שגורם הרעיון של שני יצורים המחוברים ביניהם בניגוד לדרך הטבע.

לפני כעשרים שנה בישרו כל העיתונים בעמודיהם הראשונים לעולם – שהתמלא בהערצה ובאי-שקט גם יחד – על הנס האחרון של המדע: יצירת תינוק במעבדה. באנגליה הצליחה קבוצת מדענים להביא ללידת תינוק, מהפריה שהתרחשה תשעה חודשים קודם לכן לא בדרך הישנה והמוכרת אלא במבחנה. אירוע כזה, כך הכריזה מיד העיתונות העולמית, יהפוך על פיהן לא רק את הביולוגיה ואת הרפואה אלא את החברה כולה. במשך אלפי שנים חיפשו האנשים דרך להתענג מבלי להביא ללידת ילד. לבסוף יהיו ילדים בלי תענוג!

בכל העיתונות נחשבה הידיעה כהישג חסר תקדים במדעי החיים. ועם זאת, כל החידוש היה בכך שיישמו בבני אדם תוצאות ניסויים שנעשו חמש-עשרה שנים קודם לכן אצל העכבר, חיית הניסויים הקרובה ביותר לאדם. אצל העכבר למדו לאסוף תאי זרע וביציות, לערבבם כדי להשיג מיזוג של שניהם במבחנה; לשתול מחדש את העוברים שנוצרו כך אצל העכברות הפונדקאיות; להקפיא עוברים; להפשירם ולהשתילם שנים אחר כך, ולחולל כך אנדרלמוסיה בין הדורות; בקיצור, כך השתלטו לחלוטין על ראשיתה של התפתחות העובר.

מה שמבדיל בין מחקר בסיסי למחקר יישומי הוא שבזה האחרון יודעים מה עומדים למצוא, בעוד שבראשון אין יודעים זאת כלל. במחקר היישומי משתדלים לשכלל את הפרטים, להביא לביצוע של תוכנית נתונה. המחקר הבסיסי חותר להשיג ידע והבנה יסודיים. במקרה של תינוק המבחנה היתה המטרה בעיקר לבדוק אצל האישה את התנאים ליישום הידע שנצבר ממחקרים בעכבר. צריך היה לדעת את לוח הזמנים המאפשר לאסוף את הביציות, ואת מינון ההורמונים שיש לתת כדי לקבל את התוצאה הרצויה. לא רק המטרה היתה ידועה מראש, אלא גם ניתן היה בהחלט לחזות את ההתפתחויות, את תוצאות הלוואי, ואת כל ההשלכות הנוספות: הקפאת עוברים ושתילתם מחדש אצל אמהות פונדקאיות שונות; ייצור תינוקות מזרע של גברים שהלכו לעולמם, הרצון לילדים אצל זוגות או נשים שתנאי חייהם אינם מתאימים כלל להתפתחותם של ילדים; סחר עוברים; ערבוב סדר הדורות, כאשר האחיין הקטן יוכל לעשות ילד לדודה רבה שלו וכו'. השתתפתי בכנס על התרבות העכברים בתחילת שנות השבעים. בערב, לאחר הארוחה, דיברו

המשתתפים בצורה חופשית מאוד על יישום שיטות ההפריה במעבדה, שיטות שבהן השתמשו בהן אצל העכברים, לבני האדם. הם דמיינו גם את המצבים והפנטזיות שתעורר בוודאי ההפריה במעבדה אצל בני האדם.

קונצרט של תשואות קידם אפוא את פניו של תינוק המבחנה הראשון. ועם זאת, בסופו של חשבון, לא היה זה אלא שינוי קטן ביותר במהלך העניינים הרגיל. שינוי זעיר בראשונה מתוך סדרה של מאות אלפי ריאקציות, המתרחשות במהלך התפתחותו של העובר. פשוט השתמשו במיכל פלסטיק כממלא מקומו של אתר המפגש הרגיל בין תא זרע לביצית: החצוצרה. אך אפשר היה בהחלט שלא להסתפק בזה. היום כבר מדברים על הרחבת השימוש במבחנה לשלבים שאחרי ההפריה. יש המרחיקים לכת עד כדי לנבא כי, כמו ב"עולם חדש ואמיץ" של אלדוס האקסלי, כל התפתחות העובר, תשעת החודשים של ההתפתחות ברחם, תתרחש במכלים שיכילו מצעי תרבית משוכללים יותר ויותר. כשיגיע היום הזה, הוא בוודאי יצית מקהלה חדשה של קריאות זעם, בהלה והערצה. שוב יפרחו כותרות בעמוד הראשון. כמה מדענים יתפטרו כדי להפגין כי בהחלט הרחיקו כאן לכת, כי יש לעצור את המחקרים הללו המובילים את האנושות אל אובדנה. ועדות האתיקה יחליטו על תת-ועדות מקצועיות. בית הנבחרים ידון בדחיפות מתונה בנחיצות לחוקק שורה של חוקים חדשים.

אך הנפלא בלידתו של ילד, הפלאי בהופעתו של אדם חדש, אינו טבעו של המכל שבתוכו מתרחש השלב הראשון. אין הוא אפילו טמון בהצלחה לגרום לכך שכל התהליך יתרחש במבחנה. הבלתי-ייאמן הוא התהליך עצמו. כי המפגש של תא זרע וביצית מתניע שורה אדירה של ריאקציות, מאות אלפים, המתרחשות בזו אחר זו, חופפות ומצטלבות ברשת של מורכבות מדהימה. וכל זאת כדי להגיע, יהיו אשר יהיו התנאים, להופעתו של תינוק אדם, ולעולם לא ברווז קטן, ג'ירפה קטנה או פרפר קטן. המדהים הוא כי עם סיום ההפריה מתחיל התא הראשון, הביצית המופרית, להתחלק. שני תאים נוצרים. אחר כך ארבעה. אחר כך שמונה. ואחר כך אשכול קטן של תאים. פלא הוא כי אשכול זה נצמד אל דופן הרחם, כי הוא מתארך, גדל, וכמה חודשים מאוחר יותר הוא נהיה לתינוק שיש לו – ביותר מתשעים וחמישה אחוז מן המקרים – כל מה שנחוץ לו כדי לחיות, להתהלך בעולם ואפילו לחשוב. הנה זהו הנס. זוהי התופעה המדהימה ביותר המתרחשת בעולם הזה. כל כך מדהימה, עד שהיא היתה צריכה לעורר השתאות בתבל כולה, עד כי בני האדם היו צריכים להקדיש את זמנם לתהות על המנגנונים שבבסיסו של פלא כזה.

ובכן איש אינו מתעניין בתופעה מופלאה זו, לבד מכמה מקצוענים נדירים. איש אינו מדבר עליה. בעיקר לא העיתונים. אנו כה רגילים לה, אנו כה מורגלים לראות, תשעה חודשים לאחר מעשה האהבה, את הופעתו של תינוק, עד כי איננו שואלים את עצמנו על אודות האירועים המתרחשים בין שני המאורעות האלה. זהו נתון של הטבע. ככה זה. למעשה, התהליך הזה נותר זמן רב בגדר מסתורין מוחלט. עד העת האחרונה לא היה כמעט שמץ מראית של רעיון בדבר הכוחות והמנגנונים הפועלים כאן. מזה כמה שנים בלבד מתחילים להתגלות היבטים מסוימים של מסתורין ראשוני זה. זאת תוצאה של תמורה עמוקה מאוד, שהתרחשה רק לאחרונה, באופן ההתבוננות שלנו ביצורים חיים, במבנה ובתפקוד שלהם; של שינוי עמוק בדימוי שיש לנו בכל מה שנוגע לעולם החי.

סיפור אחר, לא פחות מאלף: זה של הסרטן. בשנות השבעים הנשיא ניקסון, שהיה אכול קנאה ביוקרה שזכה לה ג'ון קנדי כשעודד את המסע אל הירח, שם לו כמטרה מיתוס אחר: הסרטן. הוא הכריז עליו מלחמה והחליט כי אם רק יקדישו לכך את האמצעים, הסרטן ינוצח בתוך חמש שנים. ההמשך ידוע: כסף רב הוצא, אך לא הושגה שום תוצאה. במקרה של הירח, כל התשתית המושגית

כבר היתה קיימת מזה זמן רב. לא היה צורך אלא באמצעים, ארגון והתמדה. אשר לסרטן, איש לא ידע אף אחד מן המנגנונים הבסיסיים המְתאמים את חלוקת התאים והתמיינותם. המאמץ שהוחלט עליו לא יכול היה אלא להיכשל. ואז, בראשית שנות השמונים, החל הנוף להשתנות. סוג העבודה אשר עד אז ייצג את שיא הקידמה בחקר הסרטן, אבד עליו הכלח בין לילה. תחום מחקר זה, שהסטודנטים המוכשרים ביותר התרחקו ממנו כמו מאש, נעשה לפתע רוחש אדם, ומשך אליו את המוכשרים ביותר. פתאום הוא הפך לאחד התחומים המרגשים ביותר, המבטיחים ביותר בביולוגיה.

מה גרם למהפכה זו? ודאי לא החלטה מנהלית. גם לא השקעה אדירה של כסף בנוסח ניקסון. פשוט, קרה דבר שאכן מתרחש במחקר הבסיסי מעת לעת: סדרה מפליאה של הפתעות שלא יכלו להיות תוצאה של שום תוכנית, של שום תכנון. הפתעות אלה היו תוצאות של ההנדסה הגנטית, אשר יושמו לבעיות של ביולוגיה בסיסית. ההנדסה הגנטית – היא עצמה תוצר של הפתעה עצומה מסוף שנות השישים – אפשרה לבודד גן של אורגניזם כלשהו ולהחדירו לאחר. כך ניתן היה להוציא מתאים סרטניים גנים מסוימים אשר, לאחר שהוחדרו לתאים נורמליים, הפכו אותם לסרטניים. היו קיימים אפוא "גנים של סרטן" או "אונקוגנים". אחר כך נמצאו גנים שנתכַּנו "אנטי-סרטניים", גנים אשר ביטלו את השפעת המסרטנים. בקיצור, נמצא ממש מחסן גנטי אשר, כפי שניתן היה לצפות, היה קשור הדוקות לקבוצת הגנים האחראים לוויסות ולחלוקה של התאים הקשורה להתמיינותם. האונקוגנים מעודדים את הִתרבות התאים. האנטי-סרטניים בולמים אותה. גידולים סרטניים מופיעים בשל עודף אונקוגנים או מחסור באנטי-סרטניים. לראשונה בתולדותיו נעשה מחקר הסרטן לתחום מכובד. לראשונה יכולנו להבחין במנגנונים שביסוד הממאירות של התא. בפעם הראשונה יכולנו לשקול את האפשרות – הרחוקה מאוד עדיין – להתערב במנגנונים אלה. כל זה היה תוצאה של דרך חדשה להתבונן בתא ולחקור אותו; תוצאה של שינוי בדרך שבה אנו מייצגים לעצמנו את היצורים החיים.

זה בדיוק תפקידו של המדע – לספק תמונה של העולם, של היצורים החיים ושל העצמים הדוממים – תמונה העונה על דרישות מסוימות: להתבונן פנימה, לחדור מתחת לפני השטח ולהעמיק מעבר למראה החיצוני של הדברים; להשתחרר, ככל האפשר, מן האשליות שכופה עלינו טבעם של חושינו ומוחנו. אלה הם תוצר של ההתפתחות. הם מותאמים לאורח חייו של כל אורגניזם. האבולוציה העניקה לבני האדם אמצעים שבזכותם הוא מסוגל לחיות על פני כדור הארץ, לתפוס בחושים ובתודעה את העצמים של המציאות היומיומית הסובבים אותו, להתייחס אל עָבר הניתן לזכירה ואל עתיד הניתן להדמיה. ברגע שאנו עוזבים עולם זה, העולם הנתפס על ידי ניסיוננו הישיר, ברגע שמתרחקים מהעצמים שממדיהם ממוצעים, מוחנו אינו יכול לעקוב. על זה עמדו הפיזיקאים במהלך המאה העשרים כאשר ביקשו להבין את הקטן עד אינסוף ואת הגדול עד אינסוף.

אפשר לומר כי המדען חי בשני עולמות. מצד אחד נמצא העולם הרגיל, העולם הפומבי, שבו הוא מתחלק עם בני אדם אחרים. מצד שני, הוא חי בעולם אישי שם מתרחש המחקר: עולם עם תשוקותיו, ריגושיו, ייאושיו; עולם שאפשר להתרומם בו לגבהים או ליפול לתהומות. הקרבה ביניהם עשויה להיות רבה או מעטה בהתאם לאנשים המעורבים, לפי תחומי העיסוק. קנאה, תחרותיות, הצורך בהכרה, כולם כוחות הפועלים בעולם החולין, אבל הם גם עוזרים לדחוף את האנשים בעולם האישי. ובאותו אופן, חלומות וניצחונות בעולם האישי מתערבבים בגילויים פחות אציליים של תגמול בעולם הרגיל.

בעזרת תיאוריות, השערות וחישובים, בונה הפיזיקה את הייצוגים שלה, שאותם אנו מעריכים אל מול "המציאות". תורת הקוונטים ותורת היחסות מובילות אל מסקנות המנוגדות לתפיסה החושית שלנו בנוגע לזמן ולמרחב. לתוצאות רבות המתקבלות מן החישובים אין כמעט כל משמעות כאשר מתרגמים אותן ללשון יומיום. למשל, הידיעה כי אם נטוס דרך הגלקסיות למרחק גדול דיו ובמהירות מספקת, נֵעשה לבסוף צעירים יותר. או הרעיון כי אלקטרון יכול להיות בה בעת גל וגם חלקיק, וכן שהוא יכול להתקיים במקביל גם פה וגם שם. וגם זאת – בקצה השני של סולם סדרי הגודל – שליקום שלנו יש קוטר של בערך (!) עשרה מיליארד שנות-אור. שהוא נוצר ממפץ גדול שבו אנרגיה דחוסה עד אין-סוף התפשטה לפתע. כי כל עולמנו התהווה בכמה מאיות של שנייה. כי הגלקסיה שלנו נעה במהירות של כחמש-מאות קילומטרים בשנייה. כל הרעיונות הללו נובעים מחישובים מתמטיים מסובכים. אין להם משמעות אלא בשביל המדען, הסבור כי אין טעם לתרגם נוסחאות אלה ללשון יומיום. כך נוצרת תהום בין הפיזיקאי, המגיע בחישוביו למציאות החורגת מעבר לדמיון, לבין ציבור המבקש להשיג בהבנתו אותה מציאות אשר הראיות המתמטיות לנכונותה מערערות על מה שנתפס בחושיו.

הפער בין תמונתו של עצם כלשהו, כפי שמציגה אותו הפיזיקה, לבין הייצוג שמספקים לנו חושינו, מתואר היטב על ידי האסטרו-פיזיקאי האנגלי סר ארתור אֶדינגטון (Eddington, Arthur – **The Nature of the Physical World**, University of Michigan Press, 1963, p. XI) בתיאור של מה שהוא מכנה "שני השולחנות". הראשון, "השולחן המוכר", הוא רהיט מעץ, לוח הניצב על ארבע רגליים; זה החפץ של יומיום, העשוי מ"חומר" שעליו נשען אדינגטון כדי לכתוב. השני הוא "השולחן המדעי", מעין רִיק שבו נעים במהירות עצומה חלקיקים שונים. כדי לכתוב, אדינגטון מציב את הרִיק של מרפקו המדעי על הרִיק של שולחנו המדעי. התמונה של עצם שיוצרת הפיזיקה היא אפוא מבנה תיאורטי. היא תוצאה של השערות שהצטברו במהלך מאות שנים. עולם הפיזיקה הוא עולם של הפשָטות, של סמלים. אין זה אומר שכל סמל מייצג קטע מסוים של עולם היומיום. גם לא משהו שניתן להסבירו במונחים של ניסיון החושים. המצב דומה קצת לכתיבה, בכך שהאותיות של המלה הכתובה מסמלות את הדבר שמייצגת מלה זו.

הביולוגיה עדיין לא הגיעה למעמד זה. יש בה הרבה הכללות, אך מעט מאוד תיאוריות. החשובה ביותר היא תורת האבולוציה, הואיל והיא מאגדת אוסף ענק של תצפיות מתחומים מגוונים ביותר, אשר בלעדיה ייוותרו מבודדות; הואיל והיא מקשרת בין כל התחומים הנוגעים ליצורים החיים; הואיל והיא מכוננת סדר במגוון העצום של האורגניזמים; בקיצור, הואיל והיא מסַפקת הסבר סיבתי לעולם החי ולגיוונו העצום. מה מוזר – התיאוריות של הפיזיקה, כגון תורת היחסות ותורת הקוואנטים, אינן מובנות לציבור. אך אין הן נתונות לוויכוח או לערעור. לגבי תורת האבולוציה, ההפך הוא הנכון. כולם חושבים שהם מבינים אותה. אבל היא נתונה למחלוקות, ויש גם הפוסלים אותה מסיבות בלתי רלוונטיות לחלוטין. גם הביולוגיה מנסה לבנות באמצעות התיאוריות שלה ייצוגים של מושאי חקירתה – האורגניזמים החיים.

בשביל הביולוג יש שני סוגים של אורגניזמים, שני סוגים של כלבים, למשל. הראשון, "הכלב הביתי", הוא זה שמלטפים אותו ושורקים לו כדי ללכת לטייל. השני, "הכלב הביולוגי", הוא מעין יצור מופשט, הבנוי בהתאם לתיאוריות רווחות ומשתנה ככל שהללו משתנות. בראשית המאה העשרים, למשל, "הכלב הביולוגי" היה בראש ובראשונה "קולואידי" (קולואיד הוא תמיסה בעלת מרקם צמיג במיוחד, כמו חלבון ביצה, למשל. ז'קוב משתמש בקולואיד כדימוי לתערובת ללא סדר פנימי ברור, וללא צורה מוגדרת). היה זה מעין שיבוט, אוסף תאים מסוגים שונים, תאי שריר, תאי

עצב, תאי בלוטות וכו׳; כולם נוצרו מחלוקה של אותו תא ראשוני, הביצית המופרית. התא נתפס כשק של אנזימים – הזָרזים של הריאקציות הכימיות – הצפים בתוך טיפה של ״נוזל קולואידי״, מעין חומר דמוי מקפא המתאים לפעולת האנזימים. הגנים, המותקנים על הכרומוזומים, קובעים את תכונות האורגניזם, בלי כל קשר להתאים. וכך, ״הכלב הביולוגי״ נחקר על ידי מקצועות שונים אשר תכופות התעלמו לחלוטין אלה מאלה. ניתן כך למצוא באותו מסדרון, לעתים דלת ליד דלת, ביוכימאי וגנטיקאי שאפילו אינם מדברים ביניהם.

באמצע המאה העשרים עמד ״הכלב הביולוגי״ שלנו להפוך למולקולרי. ביוכימאים וגנטיקאים עבדו בשיתוף פעולה הדוק על אותם אורגניזמים, שהם הפשוטים ביותר בעולם החי: חיידקים ונגיפים. בתוך כמה שנים השתנה הנוף כליל. האנזימים היו לחלבונים. כל חלבון מורכב מרצף ייחודי של חומצות אמיניות. הגנים הם מקטעים של הסליל הכפול של הדנ״א. כל גן היה בנוי מרצף ייחודי של נוקלֶאוֹטידים. כל גן הכיל את המידע הקובע את מבנה החלבון הייחודי. במלים אחרות, רצף של נוקלאוטידים בדנ״א מגדיר רצף של חומצות אמיניות, ובכך את המבנה התלת-ממדי של החלבון. המנגנון המייצר את החלבון מפורק למרכיביו בשני שלבים: תעתוק של הגן לרנ״א שליח, ותרגום של השליח לשרשרת פֶּפְּטידים. התבטאות הגנים מבוקרת על ידי לולאות ויסות שבהן פועלות מולקולות שונות, המסוגלות להפעיל או לדכא בדרך ייחודית את התבטאותו של גן.

הביולוגיה אומרת לנו כי משני הכלבים שלנו, הכלב האמיתי הוא ״הכלב המולקולרי״. ״הכלב הביתי״ אינו אלא השתקפות חיוורת, היבט שהוא נגיש לחושינו. עם הציוד שהעניקה לנו האבולוציה אנו יכולים לראות את הראש, את הרגליים, את העכוז של הכלב שלנו; אך לא את אשכולות התאים ואת חבילות המולקולות שהביולוגיה טוענת כי מהן – כמונו – עשוי הכלב. כדי לתפוס ולו רק כמה מן ההיבטים האחרים של ״הכלב המולקולרי״, נזדקק לציוד חושי שונה, למוח אחר. אך אם ברצוננו להבין את תפקודו של הכלב, לדעת מאין בא, ואיך לטפל בו כאשר הוא חולה, עלינו לחשוב על ״הכלב המולקולרי״.

הביולוגיה התחדשה אפוא לחלוטין במחצית השנייה של המאה העשרים. אך התיאור של אורגניזמים חיים המקובל כיום נבנה בשני שלבים. במשך שנות החמישים זכתה בעיקר האנליזה של תהליכי חילוף החומרים לשורת הצלחות מפתיעות. מצד אחד התברר כי המזונות – הסוכרים למשל – מתפרקים בהדרגה, בשרשרת של ריאקציות עוקבות, ליחידות פשוטות יותר. בה בעת כל ריאקציה משחררת אנרגיה כימית המשמשת לריאקציות אחרות. מצד שני, יחידות המזון שנוצרו בהתפרקות משמשות כחומרי גלם לבניית מרכיבי התא. בכל מקרה, היה מדובר בשרשרות קוויות של ריאקציות, רצפים שכל שלב שלהם מזורז על ידי אנזים מיוחד. זה דומה קצת לפסי הייצור בבית-חרושת למכוניות, למשל. מכאן הרעיון כי אצל ״הכלב המולקולרי״ שלנו התופעות הביולוגיות מתגלמות בתהליכי שינוי קוויים, המתרחשים בסדרה ארוכה של שלבים עוקבים בזה אחר זה. לכל אנזים, כלומר לכל חלבון, יש מבנה ייחודי, הנובע מרצף ייחודי של חומצות אמינו. התכונות הכימיות של חלבון תלויות במבנהו של אתר זיהוי ייחודי המאפשר לו לקשור תרכובת מסוימת ולזרז שינוי כימי שלה. אלא שהרצף של החומצות האמיניות בחלבון מוצפן ברצף הנוקלאוטידים של הגן המקודד את החלבון הזה. אם כל חלבון הוא ייחודי, הרי כל גן גם הוא ייחודי.

האבולוציה נראתה אם כן כתהליך רצוף וקווי פחות או יותר, תהליך שהוא תולדה של מוטציות אשר שינו את תכונות החלבונים. אלה מבין הצורות המוטנטיות שהתאימו טוב יותר, הן שהועדפו על ידי הברירה הטבעית. באשר לעלייה במורכבות המתלווה לאבולוציה, זו נבעה

מתוספת רציפה וקווית של דנ״א לגנום. וזה הוביל לרבדים של חידושים ביוכימיים ופיזיולוגיים שהונחו זה על גבי זה.

המחשבה שמורכבות עולם החי יכולה להתפרק למולקולות קוויות, לשרשרות ריאקציות – היה בה כדי לספק את המוח האנושי, המורגל לנוע בזמן רצוף וקווי מהלידה עד המוות. אולם בשנות השבעים החלו בקיעים לסדוק את הרציפות ולשבור את הקוויות. זה קרה לאחר שההנדסה הגנטית סיפקה גישה אל מה שנותר עד אז מחוץ לטווח הניסוי: הגנים של יצורים עילאיים. מכאן שפע יבול של הפתעות: שבירת הרצף של הגנים; קיומן של משפחות גנים – עד עשרים או שלושים – בעלי מבנים קרובים מאוד באותו אורגניזם; שימור מפתיע של מבנה ותפקוד של גנים רבים לאורך כל האבולוציה, והנותרים כמעט זהים בקרב רוב האורגניזמים. התברר כי האדריכלות הפנימית של הגנים היא תולדה של צירופים שונים של קטעי דנ״א קצרים יחסית; וכי כל אחד מהם מקודד מוטיב מסוים שמבנהו המרחבי ומטענו החשמלי קובעים את כושרו לזהות ולפעול עם מולקולות אחרות. כל הרעיונות האלה לא עלו בקנה אחד עם התמונה שהצטיירה עד אז של מבנה ותפקוד ״הכלב המולקולרי״.

לפי ההשקפה החדשה, מבנה עולם החי אינו עוד קווי ורצוף, אלא להפך, מקוטע ולא ישר. גנים וחלבונים אינם עוד עצמים ייחודיים למין מסוים. מבנים רבים נראים דומים מאוד בין מין למין. יתר על כן, בתוך אותו מין נמצאים לעתים קרובות מבנים דומים מאוד הממלאים תפקידים שונים מאוד. נוסף לכך, לעתים תכופות רואים קטעים בעלי רצפים זהים מופרדים על ידי קטעים בעלי רצפים שונים. גנים וחלבונים הם לרוב מעין פסיפסים הנוצרים על ידי צירוף כמה רכיבים, כמה מוטיבים שכל אחד מהם נושא אתר מזהה. מספרם של המוטיבים מוגבל, אלף או אלפיים. המוטיבים נוטים מטבעם ליצור צירופים שונים ותכונה זו היא המקנה לחלבונים את גיוונם האינסופי. צירוף של מוטיבים מסוימים הוא המקנה לחלבון את תכונותיו הייחודיות.

הרכיב הבסיסי – זה המעורב ישירות בכימיה של התא – הוא אתר ההיכרות הנמצא באזור חלבוני. בתחילה נראה כי ההיכרות בין המולקולות מוגבלת לפעילות הגומלין בין אנזים לתשתית או בין אנטיגן לנוגדן. עתה מייחסים לה את התפקיד הראשי בריאקציות מגוונות: פולימֶריזציה של חלבונים ליצירת מבנים כגון חלבוני שריר, שלד התא, ריבוזומים, מעטפות נגיפים; פעילות גומלין של חלבון ודנ״א בוויסות פעילות הגנים; פעילות גומלין קולטן-לִיגַנד (ליגנד הוא מונח המציין חומר כלשהו הנקשר לקולטן בקרום תא. ליגנד עשוי להיות מולקולה של הורמון, חומר שהופרש מתא שכן וכו׳) בשורה שלמה של תופעות, כגון העברה של אותות, פעילות גומלין בין תאים, היצמדות תאים וכו׳. אתרי היכרות רבים השתמרו ללא שינוי במשך כל האבולוציה. ואנו מוצאים גירסאות זהות כמעט אצל אורגניזמים שונים ביותר.

אפשר לראות את השינויים שחלו בדרך החשיבה על האבולוציה הביוכימית. כל עוד כל גן, ולכן גם כל חלבון, נחשב כעצם מיוחד, תוצר של רצף ייחודי של נוקלאוטידים או חומצות אמיניות, כל אחד מהם לא יכול היה להיווצר אלא על ידי בריאה מחדש – דבר בלתי סביר בעליל. אך קיומן של משפחות חלבונים בעלות מבנה בסיסי זהה, בנייתם של חלבונים כפסיפס הנוצר ממוטיבים המצויים בחלבונים רבים, הגילוי המפתיע כי במהלך האבולוציה החלבונים משמרים את המוטיבים הייחודיים שלהם ואת אתריהם הפעילים למרות גיוון צורות ענקי, החלק היצירתי של האבולוציה הביוכימית לא צץ יש מאין. הוא מושתת על בניית חדש מישן. זה מה שכיניתי במקום אחר ״עמלנות מולקולרית״ (במקור – bricolage, שפירושו ״מלאכת יד״, ״מלאכת תחביב״, כדימוי לעיסוק מתמיד בידיים ועשייה מתמשכת של דברים שונים. (ראו בספרו של ז׳קוב: **בין המצוי לרצוי**, הוצאת כתר, ירושלים, 1989). הגנים הראשונים נוצרו כנראה מרצפים קצרים של

נוקלאוטידים, שלושים או ארבעים. קטעים אלה גדלו במשך הזמן, בין אם על ידי התחברותם אלה לאלה, בין אם על ידי הכפלה של קטעים פעם אחת או כמה פעמים. בגנים רבים מוצאים אכן את עקבותיהן של הכפלה אחת, ואפילו של שתיים, שלוש הכפלות רצופות או יותר; ובעקבותיהן מידה קטנה או גדולה של התגוונות. ההכפלה הזאת של קטעי דנ״א או של גנים שלמים, נראֶה שהיא אחת מדרכי הפעולה העיקריות של העמלנות המולקולרית. על ידי הכפלות חוזרות ונשנות נוצרו משפחות רבות של גנים כמו אלה של המוגלובינים, של גורמי ויסות רבים או הגנים של משפחת האימונוגלוֹבּוּלינים, הממלאים תפקידים הקשורים לוויסות, כמו זיהוי אנטיגנים, היצמדות תאים או הכוונה של אַקסונים (axones – שלוחות של תאי עצב).

דרך נוספת לבניית גנים מתבטאת בסידורם מחדש של קטעים קיימים כדי ליצור גנים פסיפסיים. כאן מעורב גם היבט הברירה. ההפתעה האדירה היתה לגלות את ההשתמרות, ההתקבעות המוחלטת כמעט, לאורך האבולוציה, של המוטיבים של אתרי ההיכרות הייחודיים בחלבונים, למרות המגוון העצום של המינים הביולוגיים. הדבר מוסבר על ידי האילוצים החזקים המכבידים על אתרי היכרות אלה, שהם הבסיס של כל פעולות הגומלין המולקולריות; ומכאן, של כל הפעילויות הכימיות של התא. הייחודיות של פעולות הגומלין המולקולריות חייבת להישמר. וזה ההסבר להתקבעותם של המבנים הללו במשך האבולוציה. ההשתמרות הזו חלה על אותו קטע של גן, אותו אֶקסון (exon – קטע של דנ״א הנושא קוד לחלבון) המכיל את הקוד לאתר ההיכרות החלבוני. אין היא חלה על קטעים שאינם מקודדים (או אינטרונים – Introns); וגם לא על הסביבה, על מבנה הקטעים המצויים ליד האֶקסון שבו מדובר. אינטרונים וקטעים קרובים של דנ״א יכולים אפוא להחליף את מיקומיהם ללא הגבלה. ומכאן מסתמנת הדרך השנייה של עמלנות מולקולרית: סידורם מחדש של קטעים של דנ״א ושל אֶקסונים ויצירת חלבונים פסיפסיים.

נחזור ונאמר: ריבוי הצירופים השונים של מספר מוגבל של רכיבים, הוא זה שיצר את המגוון העצום של מבנים הבונים את המרכיבים העיקריים של התא. האבולוציה הביוכימית אינה מתבססת אלא באופן משני על מוטציות, בניגוד למה שחשבו במשך זמן רב. היא מבוססת קודם כל על הכפלת קטעים של דנ״א ועל סידורם מחדש. יש באבולוציה זו נקודות שהן אכן קבועות – איים של אתרי היכרות ייחודיים מסביב לקטעי דנ״א המקודדים אותם, קטעים אחרים של דנ״א מתחלפים פחות או יותר בחופשיות, כמו במעין בלט. בתנאים אלה, המבנים הבסיסיים, אתרי ההיכרות, שבים ומופיעים בכל האורגניזמים, אך בהקשרים העשויים להיות שונים בכל פעם. כל עולם החי דומה כך למעין משחק מֶכָּנוֹ ענק. משתמשים באותן אבני בניין, שאפשר לפרקן ולהרכיבן מחדש בדרכים שונות, וכך ליצור צורות שונות. אך ביסודו של דבר, משתמשים תמיד באותם רכיבים.

המבנה הפסיפסי של הגנים והחלבונים מאפשר להם לקיים פעולות גומלין רבות. יצירתם של תצמידי חלבונים, שלעתים הם גדולים מאוד, מוסיפה עוד על אפשרויות אלה. וכך, תהליכים בסיסיים בחיי התא, הכוללים מספר גדול של ריאקציות מורכבות, מתבצעים על ידי תצמידים ייחודיים כאלה. דבר זה נכון במיוחד לגבי פעולות הקשורות לחלוקת התא או לפעולות הגומלין בין תאים, וכן לגבי שלבים מסוימים של המוֹרפוֹגֶנֶזָה (כינוי למכלול התהליכים שבהם מתעצבת צורת האיברים השונים). הגנים של מכלול המבצע פעולות כאלה קשורים על ידי תהליכי זיהוי תוך-תאיים, השומרים על קשר הדוק בין תוצריהם. מכלול הגנים השולט על חלוקת התא הוא אותו מכלול אצל השמרים ואצל האדם. הם שמרו על תפקודיהם ועל חלק גדול של מבניהם במשך אבולוציה המשתרעת על פני יותר מחמש מאות מיליוני שנים. למכלולים אלה נתן אנטוניו

גרסיה-בלידו (Antonio Garcia-Bellido) את השם "סינטגמים" (Syntagmes). הם מתפקדים כמעין רכיבים מודולריים המשמשים במבנה של כל התאים.

בנייה במבנים מודולריים הנקבעים על ידי מכלולי גנים נצפית גם בהתפתחות העובר של מינים רבים; אולי אפילו בכל המינים. נראה שהאורגניזמים – במיוחד החרקים – מתפתחים במתכונת של פרקים, כלומר מבנים רב-תאיים חוזרים ונשנים. מבנים אלה הם תחילה זהים, ובהמשך הם מתמיינים בדרך ייחודית בהשפעת קבוצות של גנים מווסתים, כגון ההומיאוגנים (homéogènes). תפקידם של גנים אלה הוא לשנות את הכללים הקובעים את ההתפתחות של יחידה חוזרת ונשנית, או פרק סטנדרטי. הם מגדירים כך שטח מתוחם בבירור ומעניקים לכל מקטע זהות ייחודית. כל אחד מן השטחים האלה, מן הפרקים האלה, מוגדר על ידי צירוף של כמה הומיאוגנים המתפקדים במקביל באותם תאים. באותו אופן, ההתמיינות הסופית המייצרת את סוגי התאים השונים הנצפים בגוף, משתמשת במכלולי גנים שנשתמרו ופועלים בצוותא. כך נוצרים, למשל, תאי שריר או תאי עצב אצל כל האורגניזמים שנחקרו, מן הנֶמָטוֹדָה ועד האדם.

אנו רואים אם כן כיצד השתנתה במשך חמש-עשרה או עשרים שנה התמונה שציירנו לנו על עולם החי ואוכלוסיו. זהו שינוי עמוק של "הכלב המולקולרי" שלנו. מה שקרוב לוודאי תרם הכי הרבה לעקירתם של כמה מהרעיונות הישנים, מה שאולי חולל את ההפתעה הגדולה ביותר בעולמם של הביולוגים – נוכח מגוון הצורות וההתנהגויות בעולם החי – זו ההשתמרות, שלא שוערה עד אז, של מבנים מולקולריים ותפקודיהם מאז עידן הקַמְבְּריון, כלומר במשך יותר מחמש מאות מיליוני שנים של אבולוציה. גנים מסוימים וחלבוניהם השתמרו מאז כמעט כמות שהם, עם שינויים זעירים בלבד, שהם בלתי-נמנעים במרוצת הזמן. אחרים התרבו, עם וריאציות קטנות שאפשרו להם למלא תפקודים חדשים. ועוד אחרים התפצלו, וקטעים ממקורות שונים התאחדו ויצרו מבנים חדשים. נוסף לכך, יחידות מודולריות שנוצרו מתצמידי חלבונים, המקודדים על ידי צברים של גנים, הן התשתית לפעולות הבסיסיות בכל עולם החי.

אי אפשר אפוא, בניגוד למה שנהוג היה במשך זמן רב, לייחס את הבדלי הצורות ואת הבדלי ההתנהגויות בין המינים להבדלים שבין מבנים חלבוניים. בעיני "הסינתזה החדשה", שמשלה בכיפה מאז שנות השלושים והארבעים של המאה העשרים, מקורו של המגוון הביולוגי הוסבר במונחים של מוטציות גנטיות. המוטציות יצרו שינויים באנזימים, שינויים ששינו שלבים מסוימים בהתפתחות העובר וכתוצאה מכך השתנו צורות המינים והתנהגויותיהם. באוכלוסייה רבת-צורות (פולימוֹרפית), הברירה הטבעית עודדה את המבנים החלבוניים, כלומר את המבנים הגניים, ה"אלֶלים" (allèle), אשר אפשרו התרבות במספרים הגדולים ביותר. בהבדלים הללו בין אלֶלים הוסברה ייחודיותו של כל מין.

מזה כעשרים שנה הוטלו בספק כל-יכולתה של הברירה הטבעית ורציפותה של האבולוציה על ידי התיאוריה המכונה "שיווי משקל מקוטע", שהוצעה על ידי אלדרדג' (Eldredge) וגולד (Gould)*. נראה שתוצאות האנליזה המולקולרית מצביעות על כך שיצירת מינים חדשים אינה קשורה לסתם תוספת של גנים חדשים ותפקודים חדשים בקצה מסלול ההתפתחות של אורגניזמים עתיקים יותר. עולם החי דומה למעין משחק מֶכָּנוֹ. הוא תוצר של מערכת עתירת צירופים, שבה רכיבים פחות או יותר קבועים, קטעים של גנים או צברים של גנים הקובעים את החלקים המודולריים של פעולות מורכבות, ערוכים בסידורים שונים. המורכבות שחוללה האבולוציה נולדה מן האפשרויות הרבות לסידור מחדש של רכיבים קיימים. במלים אחרות,

הופעתן של צורות חדשות, של פֶנוֹטיפּים חדשים, מקורה לעתים תכופות, בצירופים חדשים של אותם רכיבים עצמם.

*Niles Eldredge & Stephen J. Gould – "Punctuated Equilibria: An Alternative to Phyletic Gradualism", in **Models of Paleobiology**, T.J.M. Schopf ed., Freeman, Cooper and Company, San Francisco, 1972, pp. 82-11

פרק חמישי – הזהה והשונה

על גדת נהר מסתובב לו עקרב עצבני, מבקש לעבור אל גדת הנהר השנייה. מופיעה צפרדע. "התואילי לשאת אותי על גבך כדי לחצות את הנהר? שואל העקרב. – "אינני מטורפת", עונה הצפרדע, "כדי שתעקוץ אותי?" – "לא", עונה העקרב, "איזה עניין יש לי לעקוץ אותך? הרי נטבע שנינו; וחוץ מזה, אשלם לך היטב!" הצפרדע השתכנעה והסכימה לקחת את העקרב על גבה. היא מתחילה לשחות אל הגדה השנייה. באמצע הנהר עוקץ העקרב את הצפרדע. לפני מותה היא שואלת: "מדוע עשית זאת? – כי זה בטבע שלי", אומר העקרב ושניהם טובעים במים.

העקרב האומלל הזה אינו אלא טיפש. מה שלא יחשוב – אם הוא חושב – אם אוהב הוא את רעהו או לא, אם הוא מתכנן תוכניות או לא, מרחב התמרון שלו מוגבל לברירה אחת: לעקוץ או לא לעקוץ. אין לו כל אפשרות אחרת. אין לו מאומה מן "הבחירה החופשית" שלנו. הוא מוצר טהור של הטבע במצבו הראשוני.

אבל בואו לא נתנשא. בקנה-המידה שלנו ובדרכנו, גם אנו נעולים בתוך טבענו:

אני שומע את שאון העיר,
ואסיר ללא אופק
איני רואה אלא רקיע עוין,
הקירות העירומים של כלאי.

היום חולף כאן ובוערת
מנורה בכלא.
אנו יחידים בתאי,
נוגַה יפה. הגיון יקר.

(Apollinaire, Guillaume – "Alcools", **Oeuvres poétiques**, Paris, Gallimard, p. 145)

כך לחש אפולינר כדי להזכיר כי הידיעה הצלולה של העולם, שההגיון היקר רודף להשיגה, הולכת בד בבד עם מגבלות שכלנו. ומגבלות אלה, הרי אנו נאלצים לקבלן. אבל בתנאי שמקומנו בעולם החי, הנעלה ביותר, כמובן, יהיה מוגדר בבהירות. מה שהפסיכולוגים מכנים זהותנו חייב להיות מבוסס בבירור בעולם החי כמו זהותנו החברתית או המשפחתית. בסיפור של ג׳ורג׳ ברנרד שו, המספר מסביר כי היה לו אח תאום. כששניהם רחצו באמבט יחד, אחד מהם טבע. והמסַפר מסביר: "מעולם לא נודע אם הטובע היה אחי או הייתי אני".

הסיפור הזה מטריד אותנו. כשם שטורד את מנוחתנו הרומן של ורקור (Vercors) **החיות המושחתות** (Les Animaux dénaturés). שם חוקר אתנולוג צעיר באפריקה אוכלוסייה שאין יודעים האם יש לסווגה עם קופי האדם או עם יצורי אנוש. כדי להחליט על כך, האתנולוג נושא לאישה נקבה מן הקבוצה. נולד להם תינוק והאתנולוג הורג אותו. הוא מתייצב בפני בית משפט בלונדון. כאשר יקבע בית המשפט אם הריגה זו היא רצח אדם או מסע ציד, בית המשפט ייתן תשובה לשאלה המוצגת. החוק הוא שיקבע את הטבע.

כמו כל מדע, יודעת הביולוגיה מחזורים של הלך-רוח, עם תקופות של אופטימיות המתחלפות בתקופות של דיכאון. התקופות האופטימיות חופפות לעלייתה של תיאוריה חדשה, של דרך מקורית להתבונן ביצורים החיים ובתפקודם, המספקת אמצעים חדשים כדי לנתח תופעות מסוימות. הדיכאונות נובעים מהתסכולים בניסויים כאשר, אחרי תקופת פיתוח של התיאוריה החדשה, אנו מוצאים את עצמנו שוב ניצבים בפני מבוי סתום. הופעתה של הביולוגיה המולקולרית בישרה תקופה של אופטימיות פנטסטית לביולוגיה, כאילו כל השאלות שהוצבו מאז ימי קדם עמדו לפתע למצוא את פתרונן בעזרת הקסם של הסליל הכפול. אולם השיטות שהתאימו לחיידק הקולי לא ממש מתאימות לפיל, וכך הגיעה תקופה של דיכאון. נראָה כאילו האורגניזמים העילאיים חייבים להישאר מחוץ להישג ידן של השיטות שחוללו פלאות עם החיידקים. עלייתה של ההנדסה הגנטית פתחה תקופה של אופטימיות חדשה. האפשרות לנתח לפרטים את המולקולות, ובעיקר את הגנים, של כל האורגניזמים, שינתה מן היסוד את תפיסתנו את עולם החי, בהחליפה את זו שבנתה עד שנות השבעים הביולוגיה המולקולרית.

תולדות הביולוגיה נראות קצת כמו צעידה בדרך חתחתים ארוכה ולא מתוכננת אל עבר המטריאליזם, הרֶדוקציוניזם ותפיסת האחידות של ההרכב והתפקוד של עולם החי. במשך זמן רב נותרו היצורים החיים בלתי-תלויים, כאילו מבודדים זה מזה. כל אורגניזם בוגר היה תוצאה של בריאה ייחודית. ואם כמה מהם דמו אלה לאלה, היה זה בהתאם לגחמותיו של הבורא. במאות ה-17 וה-18, האנטומיה המשווה והפיזיולוגיה גילו אט אט דמיון מסוים של ארגון ותפקוד בתוך קבוצות אורגניזמים. אך רק במאה הת-19 הוגדרו שני סוגים של יחסי קירבה בין כל היצורים החיים. קודם כל נמצאה קירבה במבנה, שהרי עם גילויו של התא, על כל יצור חי ניתן היה להסתכל כעל "שבט", כעל מושבה של תאים. יהיו אשר יהיו תפקודיהם, תפקודים עצביים, שריריים, בלוטיים וכו', כל התאים מורכבים מרְכיבים דומים, מסווגים בקבוצות של פחמימות, שומנים, חלבונים וחומצות גרעין.

אחר כך נמצאה קירבה של מוצא, עם תורת האבולוציה, שהתבססה תחילה על היחסים בין הצורות, על ההשתייכות לשכבות גיאולוגיות מסוימות, על ההשוואה של התפתחויות העוברים. עד אז נראה עולם החי כמערכת המווסתת מבחוץ. בין אם היו קבועים מאז הבריאה ובין אם "התקדמו" בשורה של אירועים עוקבים, היצורים המורכבים היוו תמיד סדרה רצופה של צורות. המבנה של עולם החי כפי שאנו מכירים אותו כיום ביטא הכרח נעלה. המחשבה שהיצורים החיים יכלו להיות שונים מכפי שהם, כי צורות אחרות עשויות לדור על פני כדור הארץ, לא היתה יכולה כלל לעלות על הדעת. עם תורת האבולוציה נעלם הרעיון של הרמוניה קבועה מראש, שבאמצעותה נכפית מערכת יחסים על היצורים החיים. את ההכרח שעולם חי יהיה כפי שהוא מחליפה האקראיות ששלטה מכבר בשמים ובעצמים הדוממים. לא רק שעולם החי עשוי בהחלט להיות שונה לחלוטין מכפי שהוא כיום, אלא הוא גם עשוי היה שלא להתקיים כלל. האורגניזמים הפכו למרכיבים של מערכת כבירה הכוללת את כדור הארץ ואת כל העצמים השוכנים בו. צורות

היצורים, תכונותיהם, מאפייניהם, נהיו כפופים לוויסות פנימי של מערכת זו, למשחק של פעולות גומלין המתאמות את פעילות הרכיבים.

באמצע המאה ה-19 מצא את עצמו האדם לפתע חלק בלתי-נפרד של עולם החי. אף כי נעשה דודן קטן של הקופים הגדולים, הוא לא ויתר אף לרגע על תחושת העליונות המובהקת שלו כלפי כל היצורים האחרים. לא זו בלבד שראה את עצמו נעלה יותר; הוא חש שונה, אחר. וגם בקרב החברה האנושית התקיימה תמיד יהירות מסוימת של "החברה הגבוהה" וכן גזענות בקרב עמים רבים. לפי המיתוס של אדם וחווה כל בני האדם הם צאצאיהם של זוג יחיד זה; מה שאמור היה – לפחות במערב – לעקור כל יהירות לגבי שושלות יוחסין, אולם לא היה בכך כדי למנוע לא את האימפריאליזם ולא את אושוויץ. והרי כמה חישובים פשוטים די בהם כדי להוכיח כי כל בני האדם החיים היום על פני כדור הארץ הם כולם פחות או יותר דודנים רחוקים, כפי שהראו הגנטיקאי האנגלי רונלד פישר (Fisher, Ronald – **The Genetical Theory of Natural Selection**, New York, Dover, 1958) ולאחרונה ריצ׳רד דוקינס (Dawkins, Richard – **River Out of Eden**, New York, Basic Books, 1995). לעתים קרובות שומעים – כך מסביר זה האחרון – אנשים המתפארים כי הם דודנים של מלכת אנגליה. אבל כולנו דודנים פחות או יותר רחוקים של מלכת אנגליה. ולאמיתו של דבר כולם קרובי משפחה של כולם. מה שמבדיל את האצילים מן האחרים הוא רק שהם כה עסוקים באילן היוחסין שלהם עד שהם טורחים לתעד את פרטי הפרטים בשקדנות יתרה.

כל זה שייך לא לביולוגיה אלא לחשבון בסיסי. הביולוגיה מעלה שני רעיונות חדשים המובילים בכיוונים מנוגדים, ומהווים מעין פרדוקס. מצד אחד, אנו מכירים כמה מיליוני מינים ומעריכים כי אין הם אלא חלק זעיר ממספרם האמיתי. נוסף לכך, נראה כי המינים החיים כיום אינם אלא חלק זעיר מן המינים שהופיעו ואחר כך נעלמו במהלך האבולוציה. אבל מאחורי מִגוון זה של צורות והתנהגויות מסתתרת אחידות מפליאה של מבנים ותפקודים. מתברר כי כל המינים, מן הפשוטים ביותר ועד המורכבים ביותר, הם דומים עוד יותר, קרובים עוד יותר אלה לאלה מכפי שיכולנו לשער עד כה. כאילו האבולוציה השתמשה תמיד באותם חומרים אבל סידרה אותם והרכיבה אותם בצורות המשתנות בהתמדה. הרי זה כאילו המינים נוצרו על ידי משחק של צירופים, מעין משחק לֶגו או מֶכָּנוֹ. אלא שמצד שני רואים בה בעת כי אצל האורגניזמים המתרבים ברבייה מינית, הכול מאורגן כך שהפרטים של אותו מין ביולוגי, פרט לתאומים זהים, הם כולם שונים אלה מאלה. כאילו כל המערכת הגנטית המתפקדת על כדור הארץ הותקנה כדי ליצור תמיד משהו שונה. מכאן הפרדוקס. מצד אחד, כל מה שנראה כל כך שונה, בסופו של חשבון הוא דומה מאוד; ומן הצד האחר, כל מה שנראה כל כך דומה הוא למעשה שונה למדי.

מה שהבהיר את מידת הקִרבה בין כל היצורים החיים, קרבה שלא שוערה עד אז, הוא שורה של רעיונות חדשים שהתגבשו במהלך עשרים וכמה השנים האחרונות. הרעיון הראשון עוסק במבנה הגנים ותוצריהם, החלבונים. אצל האורגניזמים העילאיים הגנים למעשה מקוטעים. הרצפים המקודדים חלבונים – האֶקסונים – לעתים תכופות נקטעים על ידי רצפים שאינם מקודְדים שום מידע, או אינטְרונים. החלבונים בנויים במתכונת של אזורים. אבל תמיד שבים ומופיעים אותם מוטיבים שנעשה בהם שימוש תוך שינויים קטנים. הגנים המצויים כיום הם אם כן תוצאה של סידור מחדש ויצירה מתמדת של צירופים חדשים ממספר מוגבל של מוטיבים, כאלף או אלפיים. המוטיבים עצמם, מוצאם ממספר קטן של יחידות מודולריות עתיקות יומין.

תרומה שנייה של העת האחרונה: ההתפתחויות המפתיעות של השנים האחרונות בחקר העוברים. במשך זמן רב לא ניתן היה אלא לעקוב אחר שורת האירועים המורכבים שבהם

מבצבצים אט אט הצורות והמבנים של העובּר. כך ראו איך נוצרים קפלים, "עלים" המחליקים ומסתדרים אלה על אלה, איך הם מתלפפים, ושבים ונפרשים ומצמיחים אברים. כאשר מתבוננים במינים קרובים בתוך אותה משפחה, מוצאים קווי דמיון בולטים בהתפתחות. אבל כאשר עוֹברים ממערכת אחת לאחרת מוצאים צורות התפתחות שונות. האם לא לזה ציפינו? האם בנייה של מערכות כה מגוונות כמו צורות החיים השונות אינה מחייבת דרכי פעולה שונות לגמרי? בראשית המאה ה-19 רק אטיין ז'ופרוא סנט-הילר (Étienne Geoffroy Saint-Hilaire) הצליח להבחין מאחורי מגוון הצורות ודרכי ההתפתחות במעין תוכנית כללית של הגוף, תוכנית המשותפת לרוב המינים.

בסוף המאה ה-19 כבר לא הסתפקו החוקרים בצפייה בהתפתחות העובר. הם רצו לעשות ניסויים, כדרכם של הפיזיולוגים. הם נהגו לחתוך קטע של רקמה, להעביר אותו, ולהשתילו אותו במקום אחר ולבחון את התוצאה. בניסויים אלה השתמש כל אחד באורגניזם שנראה לו המתאים ביותר. אחד היה קנאי לקיפוד הים, אחר התלהב מהצפרדע, או מוטב מהקְסֶנוֹפּוּס (xénopus), שאצלו הביצית גדולה יותר, והיה מי שהעדיף את התרנגולת, או התלהב מהעכבר. לכל אחת מחיות אלה יתרונות משלה. כל אחת מתאימה יותר לניסויים מסוימים, אך לא לאחרים. בכל אחת מהן אפשר להתמקד ביעילות בהיבטים מסוימים של ההתפתחות. אך התוצאות שנתקבלו מחקירת יצור אחד נותרו לעתים תכופות חסרות משמעות, או אפילו ללא כל קשר למה שהתרחש אצל יצורים אחרים. נראה כי רק מסלולים מסוימים הכרחיים היו משותפים לכולם, כגון הגַסְטְרוּלַציה (gastrulation), תהליך מוקדם של היווצרות מעין שקע בכדור התאים, תהליך שבאמצעותו נוצרות שכבות של תאים זו מעל זו – שלב בעל חשיבות ראשונה במעלה, כיוון שממנו מתחילים להתמיין סוגי תאים שונים ומסתמנות צורות מסוימות של הפרט החדש. דבר זה הביא אמבריולוג נודע לומר כי האירוע החשוב ביותר בתולדותיו של אדם אינו ההפריה, שבה מתחילה התפתחותו, וגם לא הלידה ולא הנישואין. זו הגסטרולציה!

אלא שבלא אנליזה גנטית אין מחקר מעמיק של העובּר. ועם קיפוד הים, הצפרדע, התרנגולת, ואפילו העכבר, במשך זמן רב לא התקיים שום מחקר גנטי, והמעט שהיה לא הספיק. כך היה עד שעלה זבוב התסיסה על בימת האמבריולוגיה. ואז נוצר מצב מוזר. מצד אחד, נתחו לפרטי פרטים את התפתחות הזבוב או הנמטודה הקטנה שמִתרבָּה במהירות. בודדו מאות מוטנטים; זיהו גנים. מצד שני, דשדשו במקום. אפילו בעבודה עם העכבר, המשמש כדגם לחקר הגנטיקה של היונקים – ובעיקר של האדם – היינו מוגבלים ליצירתן של שושלות טהורות ולחקר הכלאות ארוכות ומורכבות – עד ליום שהופיעה ההנדסה הגנטית. תוך כמה חודשים השתנה המצב לחלוטין. אצל זבוב התסיסה או אצל הנמטודה אפשר לא רק לזהות את הגנים אלא גם לבודדם, לנקותם, ללמוד את פרטי האנטומיה שלהם ולהחדירם מחדש לאורגניזם כדי לראות בדיוק איך הם פועלים. באורגניזמים שבהם לא התקיים עד אז מחקר גנטי, הצלחנו עכשיו להגיע אל גנים מסוימים. ולבסוף, אצל העכבר ואצל האדם – שם היה בסיס ידע גנטי לא מבוטל – יכולנו לבודד כל גן שהוא ולשכפלו במיליוני עותקים בתוך חיידק, לנתח אותו בפירוט ולחזור ולהחדירו לעכבר כדי לזהות באילו שלבים בהתפתחות ובאילו הרקמות הוא מתבטא.

ההנדסה הגנטית שינתה אפוא לחלוטין את הנוף הביולוגי ואת אמצעי חקירתו. במקום שקודם לכן לא ניתן היה לצפות אלא בפני השטח של התופעות, נתאפשר עתה לחדור אל לב הדברים. בפעם הראשונה נמצאה גישה אל המערכת הפועלת בבסיס התפתחות העובר של יצורים שונים, ובמיוחד של היונקים; לנתח בקפידה את המכלולים הגדולים ואת הפרטים, זו שאלה של זמן, של כמות עבודה. אבל היום אנו יודעים כי, במוקדם או במאוחר, נגיע לכך.

ההפתעה הראשונה בתחום זה היתה כאשר השוו את הגנים המעורבים בהתפתחות של אורגניזמים שונים. או בעצם כאשר חקרו אם גנים הדומים לאלה שנודעו כממלאים תפקיד מרכזי אצל הזבוב קיימים גם אצל אחרים. הודות לכושר שיש לשני הסלילים המשלימים של הדנ״א להכיר זה את זה ולהתקשר בקשר ייחודי, קל יחסית לאתר בתוך כלל הדנ״א של אורגניזם את נוכחותו של גן דומה לגן ידוע. החוקרים לא ציפו למצוא גנים דומים לגנים הידועים HOM – המקבעים את הציר הקדמי-אחורי בעובר של זבוב התסיסה – אצל יצורים שאינם חרקים, בגלל ההבדלים הגדולים בהתפתחות העוברית. למרות זאת, חיפשו אותם אצל אחרים, פשוט כדי להיות בטוחים. והנה, ראה זה פלא! מצאו אותם. בכל מקום. תחילה אצל הצפרדע. אחר כך אצל העכבר. אחר כך אצל האדם, העלוקה, הנמטודה, האַמפיוֹקסוס, ההידרה; בקיצור, אצל כל החיות שנבדקו מצאו קבוצת גנים בעלי מבנה דומה מאוד לזה של הגנים HOM של הזבוב. בכל מקום נראה שגנים אלה ממלאים את אותו תפקיד: הם מגדירים את מקומם היחסי של התאים לאורך הציר הקדמי-אחורי של החיה. אם בזבוב שעבר מוטציה באחד מגנים אלה מחדירים את הגן ההומולוגי של עכבר, הוא יפעל באופן מושלם וימלא את התפקיד שממלא הגן הנורמלי של הזבוב. והוא הדבר בגנים של האדם.

קשה לדמיין את הריגוש שחלף בעמוד השדרה של הביולוגים כשנודעו תוצאות אלה. ידוע היה מזמן כי גנים וחלבונים רבים השתמרו ללא שינוי רב במהלך האבולוציה, וכי מבנים מסוימים נותרו כמות שהם מן החיידקים ועד האדם. אבל היה מדובר בעיקר בחלבונים מבניים, כגון אלה של השרירים או באנזימים, כגון אלה המתפקדים בנשימה. הרעיון שהגנים הקובעים את מבנה גופו של האדם יוכלו להיות זהים לאלה הקובעים את מבנה גופו של זבוב, זה היה ממש לא-ייאמן! לא ייאמן כי אותה תשתית גנטית נמצאת בבסיסם של תהליכים כה שונים כמו אלה הקובעים את התפתחות שני האורגניזמים הללו!

כי אין אלה סתם גנים עצמאיים הדומים זה לזה. זו מערכת שלמה של רכיבים מתואמים שנשמרו יחד במהלך האבולוציה באותו קטע של כרומוזום; המופעלים זה אחר זה – אצל הזבוב כמו אצל העכבר – לפי סדר מדויק בזמן ובמרחב לאורך גוף העובר. אצל היונקים – האדם והעכבר – קבוצת הגנים ההומולוגים לקבוצת HOM של הזבוב נקראת HOX והיא חוזרת ונשנית כמה פעמים. גנים HOX אלה קובעים את מיקומם של החוליות, הצלעות, השרירים, ושל מבני מערכת העצבים המרכזית והסימפתטית. כמו אצל הזבוב, מוטציה באחד מגנים אלה גורמת לשינויים מורפולוגיים ביצור העתידי, ולעתים קרובות למוות טרם זמנו.

שתי מסקנות נובעות מהימצאותן של קבוצות גנים אלה, החוזרות ונשנות במידה זו או אחרת, פחות או יותר בשלמותן, בקרב כל האורגניזמים שנחקרו, ללא קשר לצורתם או לגודלם ובכל מערכות עולם החי. מצד אחד, אותם סוגי גנים קובעים, אצל בעלי חיים שונים מאוד, את צורתם של מבנים שונים לחלוטין. יש להסיק על כן כי מערכת זו אינה מכוננת מבנים מסוימים אלא מגדירה מיקומים יחסיים – לקואורדינטות של מערכות צירים, של מיקום התאים בתוך האורגניזם. במלים אחרות, תפקידן של מערכות אלה הוא אינפורמטיבי ולא מבני. מן הצד האחר, העובדה שאותן קבוצות גנים המגדירות קואורדינטות נמצאו אצל כל היצורים שנבדקו, יהא אשר יהא תהליך התפתחותם, מצביעה על עתיקות המערכת. זו התקיימה ככל הנראה בצורה ראשונית כבר לפני כשש מאות מיליון שנים אצל איזשהו אב קדמון של כל היצורים החיים כיום על פני כדור הארץ.

אין אלה אפוא רק הגנים המפעילים, אלה הקובעים את חומרי הבניין ואת הכימיה של התאים, המשתמרים ממין אל מין במהלך האבולוציה, אלא גם הגנים הבוררים, השליטים, אלה המתניעים ומכוונים את פעילותם של הגנים המפעילים. דוגמאות לתהליכים כאלה מצטברות מיום ליום. אחת מהמרשימות ביותר נוגעת לבניית העין. המורכבות והדיוק של המבנים המרכיבים את העין האנושית, האיכויות המופלאות של המכשיר הזה, אשר יותר מכל אחד אחר, מאפשר לנו גישה אל העולם הסובב אותנו, כל זה הפך את העין לדוגמה המשמשת לעתים כה תכופות כדי להוכיח את אי-אפשרותה של האבולוציה. זהו נימוק שמנפנפים בו תכופות נגד הרעיון של אבולוציה אקראית. אם בעת טיול תמצא שעון, לא תפקפק לרגע כי הוא יוצר על ידי שען. כאשר אתה מתבונן באורגניזם קצת מורכב, עם כל אבריו, גם כאן אינך מפקפק כי הוא נוצר על ידי רצונו של בורא. איך אפשר להאמין כי עינו של יונק, על הדיוק המרשים של מרכיביה, על הגיאומטריה שלה, יכולה להיות פרי של אקראיות בלבד?

יש סוגים מגוונים מאוד של עיניים בעולם החי. ללא ספק, בעלות של חיישן לאור מעניקה יתרון גדול במצבים רבים. במהלך האבולוציה הופיעה העין שוב ושוב בצורות מגוונות המבוססות על עקרונות פיזיקליים שונים. הידועות ביותר הן עין העדשה של היונקים – זו שלנו – והעין המורכבת של החרקים, זו של הזבוב. אין לך דבר פחות דומה משני סוגי עיניים אלה. אין שום דבר משותף בין הארגון, המנגנון ודרך ההתפתחות שלהן. מאז ומתמיד הן נחשבו כמבנים בלתי הומולוגיים, שהתפתחו באופן עצמאי באורגניזמים קדומים שונים. אבל אין זה כך כלל, כפי שהוכיחה לא מכבר האנליזה הגנטית של וולטר גֶהרינג (Walter Gehring) וצוותו. מזה כמה שנים ידועות אצל האדם והעכבר מוטציות אשר מפריעות להתפתחות העין. בשני המקרים, היעדרו של גן מסוים גורם למוות מוקדם של עובר חסר עיניים. שני הגנים בודדו ונחקרו. הם כמעט זהים. מוטציות אלה משפיעות אפוא, אצל האדם ואצל העכבר, על אותו גן שנשתמר היטב במהלך האבולוציה. בשני המקרים כולל הגן שני מקטעים בעלי זיקה חזקה לדנ״א, האחד דומה לזה של הגנים HOX, והאחר דומה למקטע שנמצא במשפחה אחרת של גנים המכונים PAX. ושוב, מדובר בגן שליט, אשר במקרה זה מכוון את התפתחות העין בדרגה כלשהי של המדרג הגנטי. בזמן האחרון בודד אצל זבוב התסיסה גן שהיעדרו מונע את יצירת העין. גן זה כמעט זהה לזה של העכבר. אי אפשר אפוא להימנע מן המסקנה כי אותו גן מווסת הוא חיוני להתפתחות העין, גם אצל החרקים וגם אצל היונקים. גם כאן, פעם נוספת, הממצאים עוררו תדהמה. כי הם מנוגדים לכל מה שהיה כתוב בספרי הלימוד. שהרי נראה היה ברור לכול, שהעין המורכבת של החרקים ועין העדשה של היונקים הן מבנים שאין קשר ביניהם, מבנים שהתפתחו באופן בלתי-תלוי. עתה נראה כי שתיהן נגזרו מאב-טיפוס משותף (R. Quiring, U. Waldorf, U. Kloter, W. Gehring, "Homology of the Eyeless Gene of Drosophila to the Small Eye Gene in Mice and Aniridia in Humans", in **Science**, 1994, 265, pp. 785-789).

לא פחות מפתיעה היא ההוכחה כי גן זה שולט לבדו בכל המדרג של אירועי הוויסות המעורבים בהתפתחות העין. כי ההנדסה הגנטית הצליחה להחדיר את הגן הזה לזבוב בצורה כזו שהעיניים הופיעו על הכנפיים או הרגליים של החרק! ואותה תוצאה מדהימה מתקבלת כאשר מחדירים לא את הגן של הזבוב אלא את זה של העכבר!

מחקרים אלה של העין תורמים אם כן שני רעיונות חדשים שאיש לא העלה בדעתו עד אז. מצד אחד, ראינו כי לגבי העין, פעילותו של גן שליט יחיד די בה כדי לחולל את שטף המהלכים המובילים לקביעת מיקומם של כל מרכיבי העין. יש כנראה צורך בכמה מאות גנים כדי ליצור עין

מורכבת או עין עדשה. אך כל שטף האירועים וכל מדרג המבנים הקשורים בבנייתה – כולם מופעלים על ידי גן שליט יחיד. זה אחד המקרים הנדירים הידוע, אם לא היחיד. למעשה, הממצא הזה מפתיע במקצת. כי מצב זה כרוך בסיכון רב לטעויות. שורה שלמה של תקלות עלולה להפעיל את הגן השליט ולהתניע את התהליכים המובילים ליצירת עין בנסיבות שגויות במרחב ובזמן – שגיאות מן הסוג הגורם ליצירת עיניים על כנפיים או על רגליים. ואולם מן הצד האחר, איננו חדלים להתפעל מן ההברקות של הטבע, החוזר ומשתמש באותם רכיבים גנטיים כדי ליצור אברים שונים מאוד זה מזה. ובמאבק הזה, אשר מזה עשרות שנים מעמת את החוקרים ה״הוליסטים״ עם ה״רדוקציוניסטים״, את הרוצים לחקור את השלם מול אלה המעדיפים לחקור את החלקים, דומה כי אלה האחרונים מתקרבים בהתמדה אל הניצחון.

כל היצורים החיים, מן הפשוט ביותר עד למורכב ביותר, הם אפוא קרובי משפחה. כולם דודנים מדרגה קרובה הרבה יותר מכפי שיכולנו לחשוב. עם אותם רכיבים, אותן יחידות מבנה, עולם החי התגוון בלי הרף במהלך האבולוציה. כאילו החיים, בצל איום מתמיד, היו חייבים ללבוש צורות מגוונות ביותר כדי להתקיים; למצוא דרכי התנהגות מגוונות ביותר, להשתכן בפינות היותר נידחות של כדור הארץ. והגיוון אינו מתיחס רק להבדלים בין המינים. הוא נכון גם לגבי הפרטים בתוך אותו מין. כאן מתגלה ההיבט השני של הפרדוקס שלנו. כי במהלך עשרים או שלושים השנים האחרונות הבהירה הביולוגיה יותר ויותר את הדברים המאפיינים כל פרט בטווח רחב מאוד של מינים המתרבים ברבייה מינית, ובמיוחד בקרב המין שלנו. ההבדלים האימונולוגיים התגלו תחילה בהשתלות של עור או של אברים, אחר כך במחקר הגנים הקובעים את מבנה המולקולות שעל פני התאים כמו גם את אלה הקובעים את מנגנוני הדחייה. הבדלים גנטיים רבים התגלו על ידי השוואות הדנ״א של פרטים שונים, מה שהוביל להגדרת הזהות הגנטית של כל פרט, זהות המבחינה בדייקנות רבה יותר מטביעת האצבעות וטובה הרבה יותר לגילוי פושעים או לקביעת אבהות. האימונולוגיה והגנטיקה סיפקו שפע הוכחות לכך כי, פרט לתאומים זהים, כל אחד מאתנו שונה מכל בני האדם שחיו, שחיים היום או שיחיו אי-פעם על פני כדור הארץ.

להבדלים אלה בין הפרטים יש חשיבות מיוחדת בפתולוגיה וברפואה. במשך זמן רב סברו הרופאים כי מחלות רבות נובעות משני סוגי גורמים: מצד אחד, הגורמים החיצוניים, כגון חיידקים, נגיפים, מזון, רעלים, סמים וכו׳, גורמים שהם לרוב מוגדרים ומקוטלגים היטב; מן הצד האחר, הגורמים הפנימיים, שהיו מעורפלים הרבה יותר, ובדרך כלל תויגו כ״רקע״ או ״נטייה״ והתבטאו בכך שלא כל הפרטים רגישים באותה מידה למחלה זו או אחרת. עם התקדמות המחקר בגנטיקה של האדם, התברר כי מושג זה של רגישות, העובדה כי לאדם מסוים יש נטייה לחלות במחלות מסוימות יותר מאשר באחרות, משקפת בסופו של דבר את המבנה הגנטי של אדם זה. דבר זה התברר ביתר פירוט כאשר נחקר – בעיקר על ידי הצוות של ז׳אן דוסה (Jean Dausset) – האזור של הכרומוזום המקודד את האנטי-גנים של תואם רקמות HLA. נמצא כי אנשים שנשאו צירופים מסוימים של גנים HLA היו רגישים יותר מאחרים למחלה מסוימת. המחלה – דלקת החוליות המקַשחת (ankylosing spondylitis), למשל, – מחלה של עמוד השדרה המכאיבה מאוד וגורמת נכות, פוגעת בהסתברות גדולה פי מאה באנשים בעלי גנוטיפ מסוים מאשר באחרים שאין להם גנוטיפ זה.

מזה כחמש-עשרה שנים, המאמצים המשותפים של הגנטיקה והביולוגיה המולקולרית הגבירו את יכולתנו לנתח את המבנה הגנטי של בני האדם. במשך זמן רב מיקרוביולוגים ורופאים רדפו אחר החיידקים והנגיפים שנחשבו כאחראים למחלות זיהומיות. כיום, גנטיקאים ורופאים תרים

אחר הגנים הנחשדים כאחראים להפרעות תורשתיות. ההצלחות הולכות ומצטברות. לא רק שמזהים ללא הרף גנים חדשים, אלא גם ממקמים אותם על הכרומוזומים, מבודדים אותם ומוצאים את רצף הדנ״א שלהם, וגם מפתחים אמצעים לזהות את נוכחותם אצל כל אדם. בתוך כך התגלו מולקולות שקיומן היה בלתי ידוע עד כה, כגון הַוֶּסֶת של המוליכות על קרומי התאים, אשר פגיעות מסוימות בו הן כנראה הסיבה למחלת הציסטיק פיברוזיס (CF).

עד כה, רופא שהיה נקרא אל מיטתו של חולה היה מאבחן, ובעקבות זאת מנסה לצפות את התפתחות המחלה. כיום הוא מנסה להעריך את המבנה הגנטי, את הרגישויות והנטיות, שעליהן הוא מבסס את הערכתו לגבי בריאות החולה בעתיד. יתר על כן, רפואת החיזוי אינה מסתפקת עוד בהערכת הבריאות העתידית של אזרחינו, של גברים, נשים וטף החיים כיום סביבנו, אלה שאנו יכולים לפגוש ברחוב. היא מתעניינת גם בדור הבא, באלה העתידים לבוא בעקבותינו מחר. כי הרפואה אינה מצטמצמת עוד בטיפול בחיים אחרי הלידה, כפי שעשתה זמן רב. היא משתמשת בכל האמצעים העומדים לרשותה כדי לבדוק את מצבם של הפרטים ברגע שהדבר מתאפשר לאחר ההתעברות. בדרך זו היא מבקשת לחזות מה יהיה טיבו של הילד שייוולד, של הבוגר שיתפתח ממנו. היא מנסה לזהות את מצבו, את אבריו, את צורתו ואת העיוותים העלולים להימצא בו. זמן רב היו אמצעי המחקר מוגבלים, כמו האמצעים לבדיקת חולה: מישוש, נקישות, הקשבה. אחר כך הגיעו קרני רנטגן אשר אפשרו לראות ברור יותר, אך עד מהרה התברר שהן מסוכנות לבריאותו העתידית של העובר. בעת האחרונה פיתחו הפיזיקאים שורה שלמה של מכשירים מורכבים, ובראשם מכשיר האולטרסאונד והמתקן להדמייה מגנטית (MRI), המאפשרים לראות את העובר בשלבים מוקדמים מאוד בדייקנות ובהירות שלא נודעו קודם לכן.

אולם מה ששינה באמת את אפשרויות הניתוח והחיזוי, הן השיטות המאפשרות לקחת דגימות של רקמות מן העובר. את הדגימות מוציאים מתוך נוזל השפיר, או על ידי ביופסיה מן ה-trophoblast, הרקמה המהווה את הדופן החיצוני של העובר בימים הראשונים לאחר ההפרייה, והופכת עם הזמן לחלק מן השליה. שיטות אלה, שאינן לחלוטין חסרות סיכון לעובר, השתכללו אט אט. די בכמה תאים של העובר כדי שאפשר יהיה לעשות את מה שקוראים אבחון טרום-לידתי, כלומר לנתח את מצב הגנים הנראים כחשובים בהתאם למקרה.

היום אנו יודעים אלו פגמים גנטיים מעורבים ביותר מאלף וחמש-מאות הפרעות תורשתיות. יש כמה מַבחֵנים של דנ״א המאפשרים לנתח את איכותם של רבים מהגנים הללו (מַבחֵן – תרגום ל-probe. המַבחֵן הוא מולקולה, או חלק של מולקולה, המכיל סימן שמאפשר לעקוב אחריו בקלות. המַבחֵן נקשר לקטע דנ״א ובו גן לא מוכר, ומאפשר לחוקר לזהות את הגן). אפשר לעקוב אחר גנים נוספים מדור לדור הודות לקשר שלהם עם סימנים פולימורפים (קטעים של דנ״א המשתנים בין הפרטים). אנו קרובים מאוד ליום שבו נוכל להעריך את הנטייה למחלות שונות, בעיקר לצורות מסוימות של סרטן. נוכח המחקרים הנמשכים במעבדות רבות מסביב לעולם, ועם ההתקדמות בבניית מפות כרומוזומים ומציאת רצפים של דנ״א של הגנום האנושי, ברור כי גנים שפגמים בהם מעורבים במצבים פתולוגיים שונים, יזוהו עם הזמן במספר הולך ורב. לאור כל הידוע לנו אנו יכולים לחזות איזה תפקיד יש לביולוגיה בעיצוב גורלם של האנשים לפי המבנה הגנטי שלהם, ובעיקר לפי המבנה של גנים מסוימים הידועים בהשפעתם הפתולוגית האפשרית. אך יש לדייק ולומר, כי גם אם אנו מכירים מספר גדל והולך של פגמים שמקורם גנטי, למרבה הצער עדיין איננו יודעים לטפל בכולם. לגבי רבים מהם עדיין לא ידועות התוצאות המדויקות של הפגם הגנטי ואין ברשותנו לפי שעה שום אמצעי לתקן את הפגמים הללו. מצבים פתולוגיים אחרים,

לעומת זאת, אפשר לרפא או לפחות לטפל בהם באמצעים שונים. הריפוי הגנטי, הנמצא עדיין בחיתוליו, יביא כנראה פתרון למחלות תורשתיות מסוימות או לסוגי סרטן מסוימים.

החיזויים שנוכל לעשות על בסיס האבחון הגנטי בעובר או באדם צעיר הם מסוגים שונים לגמרי. ראשית כול, אפשר שהאבחון יגלה כי המחלה תפרוץ בוודאות, כיוון שהפגם הגנטי גורר בהכרח פתולוגיה מוגדרת היטב. מחלה כזו מופיעה תכופות כבר בזמן הלידה, או זמן קצר אחר כך, כפי שרואים במקרה של המופיליה, מומים מולדים או הפרעות בחילוף החומרים. במחלות אחרות, לעומת זאת, האדם חי זמן רב חיים רגילים לחלוטין, והתופעות הפתולוגיות מופיעות רק בשלב מאוחר. כך קורה במחלת הַנטיגטון, מחלה סופנית של ניוון עצבים, המופיעה רק לקראת גיל הארבעים, או במחלת פוליציסטיות של הכליה, או במחלת האלצהיימר. אלה במובן מסוים פצצות חבויות, הטמונות בגנום, הנותרות שקטות לחלוטין לפני שהן מתפוצצות בעיצומם של החיים.

בכל המחלות הללו, פגם בגן אחד או בכמה גנים די בו כדי לחולל מצב פתולוגי. במקרים אחרים, לעומת זאת, הפגם הגנטי כשלעצמו אין בו די. הוא גורם לנטייה למחלה. הוא מגדיל את הסבירות לחלות בה; כדי שהמחלה תפרוץ, יש צורך באירועים נוספים הנובעים לרוב מן הסביבה. זה המקרה של דלקת החוליות המקֻשחת, הנזכר לעיל. ויש עוד שורה של נטיות הקשורות ב-HLA haplotype זה או אחר, כמו למשל סוכרת הנעורים התלויה באינסולין, או הֶמוֹכְּרוֹמטוֹזיס (hémochromatose idiopathique), מחלה קשה למדי של חילוף החומרים של הברזל. כמו כן, לאנשים שונים יש נטיות לסרטן זה או אחר ואנו מתחילים לזהות את המרכיבים הגנטיים האחראים לנטיות אלה. כך, למשל, ניתן לחזות כי לאדם מסוים יש סבירות גבוהה לחלות בסרטן של המעי הגס, אך לא בסרטן העור או בסרטן הריאות.

ובכן, מה נותנת לנו פיסת מידע זו לגבי העתיד בתחום הבריאות? עד לאחרונה, כשפנה אליה חולה, היתה הרפואה מגבשת אבחנה וגוזרת ממנה את התחזית להחלמתו, את הפרוגנוזה. עכשיו היא מבקשת מיד להעריך את הפרופיל הגנטי שלו ולבסס עליו את התחזית לעתיד בריאותו. אין נועצים עוד באלים כדי לדעת על חיי האדם בעתיד או על חיי צאצאיו. שואלים את הגנים. כמו שקורה תמיד עם החידושים שמביא המדע, יכולים לצמוח מהם הטוב ביותר וגם הרע ביותר. הטוב ביותר, כי כשיודעים מראש, אפשר להקדים תרופה למכה אם מכירים טיפול או אורח חיים המאפשר לחמוק מאיומי הגנטיקה. זה המקרה, למשל, באבחון טרום-לידה של פֶּנילקֶטוֹנוּרְיָה, הפרעה של חילוף החומרים העלולה לגרום לפיגור שכלי של התינוק; התרופה למכה היא משטר הזנה המציל את הרך הנולד. באופן דומה אפשר, באמצעים מתאימים, למנוע הופעת הסוכרת, על אף קיום נטייה ברורה, או למנוע שיגרון מלהתבסס מוקדם מדי או בעוצמה גדולה מדי על ידי מניעת זיהומים במעיים.

אולם כושר החיזוי הזה עלול גם להביא לרע ביותר, כאשר אין ברשותנו שום אמצעי למאבק במחלה שעליה אנו מתבשרים. כאשר האבחון הטרום-לידתי מראה, למשל, כי הילד שייוולד יהיה פגוע במחלה קטלנית, כגון ניוון שרירים קשה. כל אלה הם מצבים דרמטיים, המחייבים לחשוב על הפסקת הריון. הגרוע ביותר משמעו גם אבחון גנטי המראה כי איש צעיר או אישה צעירה שבריאותם תקינה נושאים את הגן הדומיננטי שאין מפלט ממנו של מחלת הנטיגטון, שאין לה עדיין כל טיפול או תקנה. חקר הגנים מעלה אז שורה של שאלות מהסוג: התרצה לדעת מתי וכיצד אתה עומד למות? התרצה לדעת כיצד תגיב לידיעה כזו? למי תרצה לתת גישה למידע זה? למשפחתך? למעביד שלך? למבטח שלך? למדינה?

כל זה משמעו כי כדי להסיט בהדרגה את הגרוע ביותר אל עֵבר הטוב ביותר, כדי למצוא טיפולים בְּמקום שעדיין אינם קיימים, יש להמשיך ללא הרף במחקר. ההתפתחויות שזכותנו לצפות להן מן הריפוי הגנטי, המגמגם עדיין, אינן יכולות אלא להתקדם בכיוון זה.

הרפואה ללא ספק מתפתחת, בעיקר עם התפתחות המחקר של הגנום האנושי. הודות למחקר זה נכיר בהדרגה את רוב – ובסופו של חשבון את כל – המצבים הפתולוגיים הנובעים מפגם בגן יחיד. האבחון הטרום-לידתי והאיתור המוקדם, טרם הופעת התסמינים, של מחלות הפורצות מאוחר, כגון מחלת הנטיגטון, עלול להכביד במשך שנים רבות על האנשים הלוקים בהן, אשר אלמלא האבחון לא היו יודעים או מודעים למצבם. עד כה אדם לא היה חולה אלא לאחר שהופיעו אצלו סימני מחלה. אנשים באו לביקור אצל רופא כשהם מתלוננים על כאבים כלשהם. עם חשיפתם של נתונים על הגנום ייחשפו מחלות עתידיות או סיכונים למחלה. כיום כבר ידוע לנו על משפחות הסובלות סבל רב בגלל מחלות אוטוזומָליות דומיננטיות, כגון מחלת אלצהיימר, סרטן המעי הגס או סרטן השד. אין כל ספק כי שורה שלמה של פתולוגיות תתווסף לקטגוריה זו. אנשים יהפכו חולים בטרם עת. מצבם ועתידם יידונו במונחים רפואיים בעוד הם ירגישו טוב ויישארו במשך שנים בכושר טוב.

המידע על הגנום יהפוך את הפוטנציאלי למשהו שקיים בפועַל, לפחות לגבי פגמים מֶנדֶליים בגן יחיד. אפילו אם המחלה עדיין לא התפרצה, ההוכחה הביוכימית לקיומה כבר מתועדת. הכרת הגנום תוביל לאיתור מספר גדל והולך של רצפי דנ״א אשר שינויים מסוימים בהם קשורים לסיכון מוגבר למצבים פתולוגיים כגון סוכרת, דיכאון, סרטן, בעיות בפעולת הלב וכלי הדם ויוצא באלה. במקרים מסוימים המצב הפתולוגי יהיה תלוי בצירופים של כמה שינויים גנטיים. במקרים אחרים יתווספו לכך גורמים סביבתיים. אבל אנחנו נתייחס לאנשים שיש להם סימנים גנטיים של הפרעות בלב, סכיזופרניה, או סרטן, כאל חולים, אף שעדיין לא התגלו בהם סימנים פתולוגיים כלשהם. התחזית של תסמינים קליניים אצל היחיד תמשיך להיות בלתי-מדויקת יחסית, מאחר שהיא מסתמכת על מחקרים של אוכלוסיות, אבל הממשות של הסיכון תיעשה הרבה יותר מוחשית. היום נמדד הסיכון על ידי מספרים מופשטים שאין להם כל השפעה על התפיסה שיש לאדם לגבי עצמו. אולם מעתה ואילך אנו יודעים כי הסיכון מתועד במונחים כימיים בגנום של האדם כמרכיב בר-קיימא של עצמו. החולים בכוח יהיו תחת מעקב הדוק. על ידי עצמם כמו גם על ידי רופאיהם, וכל אחד יעמוד על המשמר בהמתנה להופעת התסמינים. בין אם יש או בין אם אין אמצעי טיפול, מחלות בכוח תהיינה נוכחות מעתה כפי שלא היו מעולם.

אנו רואים אפוא כיצד השתנתה הדיאלקטיקה של הזהה והשונה, עד כמה שינתה את טבעה. אנו כולנו בה בעת קרובי משפחה ושונים, כי הרבייה המינית היא מכונה לייצור השונה. שונה מן ההורים. שונה מן הפרטים בני אותו מין. אך הגיוון שנוצר כך לא תמיד זוכה להתקבל יפה. לעתים רחוקות מבינים אותו כפי שהוא: מנוע של האבולוציה. תכופות מדי מבלבלים בין גיוון ביולוגי לגיוון חברתי ותרבותי. יש המעלים את הגיוון הביולוגי כדי להצדיק עמדות המתייחסות למשטר החברתי: יש המצדיקים אי-שוויון בכך שהם מסתמכים על סדר טבעי כביכול, המאפשר לדרג את הפרטים בהתאם ל״נורמה״ שקבעו הם עצמם. יש שהגיוון הביולוגי מוצג כרעיון שערורייתי על ידי אלה המבקרים את המשטר החברתי, והיו רוצים לראות את כל הפרטים זהים. וכך, למשל, נשמעים דיבורים על ״אי-השוויון בפני המחלה״. אין לכך שום משמעות. אי-השוויון מתבטא בטיפול, אין הוא מאפיין של המחלה. אפשר לדבר על הבדלים בפני המחלה, אך לא על אי-שוויון.

כי מבלבלים כאן שני מושגים שונים: זהות ושוויון. הראשון נוגע לתכונות בני-האדם, הגופניות כמו גם הרוחניות; השני, למעמדם החברתי או המשפטי. הראשון נקבע על ידי הביולוגיה והחינוך; השני על ידי המוסר והפוליטיקה. אין שוויון בביולוגיה. המולקולות והתאים אינם שווים או בלתי-שווים. צריך את ההומור של ג׳ורג׳ אורוול כדי לחשוב כי החיות שוות יותר או פחות. אך לעתים תכופות מדי מנוצל הבלבול הזה למטרות פוליטיות וחברתיות: אם כאשר מבקשים לכפות שוויון על הזהות; או, להפך, כאשר מבקשים לשמר את אי-השוויון ומצדיקים זאת בקיומם של הבדלים. אבל הרי צריך היה להמציא את השוויון דווקא משום שיצורי האנוש שונים; כי יש חזקים ויש חלשים, יש פקחים ויש טיפשים. אילו היינו כולנו זהים, לא היה כל עניין ברעיון השוויון.

הגיוון מצוי בעצם שורשיה של הביולוגיה. הגנים, המהווים את מורשת המין, מתחברים ונפרדים במהלך הדורות, ויוצרים צירופים שהם תמיד שונים, תמיד בני-חלוף, צירופים שהם הפרטים עצמם. צירופיות אינסופית זו של הגנים היא ההופכת כל אחד מאתנו לייחודי. היא המעניקה למין את עושרו ואת גיוונו.

פרק שישי – הטוב והרע

במיתוס של אדם וגם בזה של פאוסט, הידע יכול להוביל רק אל הרע, המסומל על ידי הנחש אצל הראשון ועל ידי השטן אצל השני. ב**אנטיגונה** של סופוקלס.

עם הידיעה שלו, חוכמת ההמצאה
שהן מעבר לכל ציפייה,
האדם מתקדם אל הרע או אל הטוב.

אבל בסופו של דבר המיתוס הכפול של פְּרוֹמֶתֵיאוּס ושל פַּנדוֹרָה הוא המתגלה כמתוחכם ביותר בנושא זה. אם להאמין להֶסיוֹדוֹס, גורל האנושות עמד להיות מוכרע במאבק שעימת את פרומתיאוס עם זאוס: הידע מול השלטון, הרציונאלי מול האי-רציונאלי. כי היה זה פרומתיאוס אשר יצר את האדם מחומר וממים. אתֵנה לימדה אותו את האסטרונומיה, את המתמטיקה, האדריכלות, הניווט, הרפואה ו״עוד אומנויות שימושיות מאוד״. הוא העמיד את כל הידע שלו לשירות האנושות. הוא היה, אומר אלבר קאמי (Camus, Albert – **Prométhé aux enfers**, (Paris, Gallimard, coll. Bibliothèque de la Pléiade, 1965, p. 839, אותו ״גיבור שאהב דיו את בני האדם כדי להביא להם בה בעת את האש ואת החירות, את הטכנולוגיה והאומנויות.״ אך עד מהרה הוא התנגש בזאוס ששנא את בני האדם, שהיו לטעמו יותר מדי שאפתנים ויומרניים.

פרומתיאוס נענש ונכבל אל הסלע שלו על שהפר את חוק זאוס והֶערים עליו לטובת בני האדם. בגוררו אל אסונו את כל האנושות, הוא מצא את עצמו במלכודת שהוא עצמו הציב. ובני האדם, הם נענשו באמצעות פנדורה, האישה שנוצרה על ידי זאוס כדי להביא להם תיבה שבה היו נעולות כל הרעות שבעולם. אלמלא הרימה האישה את המכסה, והתירה למכות הרעות להתפשט בעולם, היו בני האדם ממשיכים לחיות כמקודם, ״מוגנים מהסבל, מהעבודה הקשה ומהמחלות הכואבות המביאות את המוות.״ בהיותה מענֶה לתחבולה של פרומתיאוס, פנדורה היא עצמה תחבולה. היא האונאה בדמות אישה.

המוטיבים של פרומתיאוס ופנדורה מייצגים שני היבטים של אותו סיפור: מקורו של הסבל האנושי. הכורח לטרוח על פני האדמה כדי להשיג את מזונו הוא גם הצורך של אדם להוליד באמצעות האישה, להיוולד ולמות, לחוש בכל יום את הפחד והתקווה לקראת יום המחר. פנדורה הביאה אל העולם דו-משמעות יסודית, כפי שהראה זאת יפה ז'אן-פיאר ורנן (Jean-Pierre ,Vernant – **Myths et Pensée chez les Grecs**, Paris, Maspero, 1965, p. 32). היא הכניסה לחיי האדם את העירוב ואת הניגוד. כל טוב מכיל מאז את ניגודו הרע, כל אור את צִלו. זאוס רצה כי הטוב והרע, שנולדו מן הידע, יהיו לא רק מעורבים אלא כרוכים זה בזה ללא הפרד.

וזה מה שאנו רואים כיום לעתים תכופות. כמה מן הנזקים שמחוללים המדע ויישומיו נולדים מן השאיפה לעשות טוב. הרדיולוגים הראשונים, למשל, לא שיערו כלל כי קרני x עלולות לגרום לסרטן. כך גם לא חשדו הכימאים כי הדשנים שלהם, שנועדו לשפר את היבולים, יהפכו מקור לזיהומים מסוכנים. גם הרופאים לא שיערו, שהשימוש הנרחב באנטיביוטיקה יגרור אחריו ברירה של מיקרו-אורגניזמים עמידים בפני פעילותה. ואיש לא יכול היה להעלות על הדעת כי ההתרחבות העצומה והמהירה של הרפואה ובריאות הציבור מסוף המאה ה-19 יובילו אל התפוצצות אוכלוסין, המהווה היום אחד מהאיומים החמורים על כדור הארץ שלנו.

פרומתיאוס מסמל בשביל אנושות את המאבק נגד הטבע, נגד סדר הדברים הטבעי שנקבע על ידי האלים. מאז ומתמיד לא פסק האדם מלהיאבק: נגד העוני; נגד הקור; נגד המחלות והמוות; נגד אלימות העולם הסובב אותו. כלוא במצבו הקיומי כיצור חי, הוא סרב להיכנע לחוקי הטבע. הוא סרב להיות בעל-חיים או להיות בעל-חיים בלבד. את הסירוב הזה הוא מבטא מראשית ימיו. מאז המצאת האש, הכתב והחשבון. ובמאבק זה בא המדע – באיחור ניכר – לספק לו כלי נשק. למעשה, תולדות המדעים הן במידה מסוימת תולדות המאבק של התבונה כנגד הדוגמות הדתיות.

המדע המודרני נולד והתפתח לפי תפיסה שאותה ירש העולם המערבי מהתרבות היוונית. זו תפיסה של ידיעה משוערת המבוססת על אבן-בוחן של אמת. אבן-בוחן זו מיוסדת על ההתאמה בין הדימוי, כפי שהוא מבוטא בדיבור, לבין המציאות. ידע עיוני זה מספק תמונת עולם נאותה, ותיאור מדויק כזה הוא כשלעצמו המטרה העליונה של הידע. הידיעה המשוערת הזו מספקת תמונת עולם נאותה, ותיאור מדויק כזה הוא כשלעצמו המטרה העליונה של הידע. הידיעה הזו מאפשרת לנו לתפוס את היבטיה העמוקים ביותר של המציאות: את עקרונותיה ואת מקורה. מכאן הרעיון כי התיאוריות המדעיות מחליפות אלה את אלה כדי להתקרב יותר ויותר אל התיאוריה האידיאלית, זו שתיתן ייצוג סופי של המציאות. "המדע הוא אַסִימְפְּטוֹט [קו ישר שעקומה אינסופית מתקרבת אליו עד אין סוף, אבל לעולם אינה מגיעה אליו] של האמת", אמר ויקטור הוגו. "הוא מתקרב אליה ללא הרף אך לעולם אינו נוגע בה." (Hugo, Victor – **William Shakespeare**, Paris, 1864, p. 39).

אלא שבמהלך המאה העשרים שינה המדע את טבעו, או לפחות המדע הניסיוני. הוא לא נותר סתם צורת ידע, אוצר של ידיעות. הוא נעשה תופעה חברתית-תרבותית רבת עוצמה, המכוונת את גורל חברתנו. אם למדע יש כיום השפעה כה עמוקה על החיים החברתיים, עד כדי שינוי מערכות הערכים שלהם, אין זה רק בשל הייצוגים החדשים של המציאות שהוא מציע. הדבר קורה גם – ובעיקר – משום שהוא יצר מכלול של יישומים, של שיטות ושל מכונות, המחוללים תמורות באורחות חיינו. למעשה, ניטשטשה בהדרגה ההבחנה הקלאסית בין מדע לבין טכנולוגיה. אין עוד כמעט הבדל בין מעבדת מחקר באוניברסיטה, המתמסרת למחקר הקרוי בסיסי, לבין מעבדה במפעל תעשייתי המתעניינת ביישומים אפשריים של הידע שהושג. במקרה האחד כמו באחר

מוצאים מחקר מכוון החותר ליעדים מוגדרים ומחייב פעילות מאורגנת היטב מבחינה חברתית. לא מדובר עוד רק בפענוח העולם, אלא גם בשינויו.

יתר על כן, בגלל התקדמות הפיזיקה והביולוגיה דורש המחקר מכשור יותר ויותר משוכלל. כתוצאה מכך, יש צורך בתשתית תעשייתית בעלת טכנולוגיה גבוהה, ההולכת ומתעצמת, שתייצר את המכשור הדרוש; מכשור אשר בסופו של חשבון אינו אלא תרגום או ביטוי מעשי של מצבור תיאוריות מדעיות. בפעילות הגומלין הזו – ההשלמה ההדדית בין מדע לטכנולוגיה – קידומו של כל אחד מהם תלוי בקידומו של האחר. ועם זאת, מדע וטכנולוגיה אינם זהים זה לזו, ענייניהם וכללי תפקודם שונים לגמרי. הראשון משתדל לייצר ידע, והשנייה לפעול על העולם. הראשון משתדל לפרש, להבין; השנייה לשלוט, לנהל. אף כי לעתים תכופות יש להפריד ביניהם, הם משלימים ומַפרים זה את זו. היבט חדש זה של המדע, קשר הדוק זה עם טכנולוגיה המתרחבת תדיר וכופה את עצמה, הוא המטביע חותם כה עמוק על חיי החברה והתרבות של היום.

כדי להשתכנע בכך די להתבונן בכמה מהשפעות הביולוגיה החדישה על תרבות המערב שלנו. בראש ובראשונה על הדימויים, ואחר כך על כמה שאלות שמעוררות אפשרויות הפעולה החדשות. הישגי הביולוגיה החדישה הובילו לתפיסות מסוימות המנוגדות תכופות לרעיונות המושרשים מזה זמן רב, שחלקם עדיין תקפים היום. עולם החי מאופיין בה בעת על ידי גיוון עשיר גלוי לעין, ואחידות סמויה מן העין. יש בו לווייתני-ענק וחיידקים, פרעושים וג׳ירפות, יצורים החיים בטמפרטורות גבוהות ואחרים החיים באזורים קפואים. אך מאחורי מגוון הצורות, מגלים דמיון מפתיע של מבנים ותפקודים. האם ניתן לדמיין המחשה טובה יותר של תורת האבולוציה? מספר רב של מרכיבים ושל ריאקציות כימיות מצויים אצל כולם, החל בחיידקים וגמור ביונקים. ההבדל בין זבוב לפיל, בין נשר לשלשול, סיבתו אינה הבדלים במרכיבים הכימיים אלא באופן חלוקתם של המרכיבים הללו. אצל כל החולייתנים מוצאים את אותן ריאקציות כימיות. אין זה שוני של המולקולות העושה את היונקים שונים אלה מאלה. אלה שינויים, לעתים קטנים, המתרחשים במהלך התפתחות העובר.

רעיון אחר שנקבע על ידי הביולוגיה: חשיבות הגיוון בעולם החי. גיוון המינים על פני כדור הארץ, גיוון הפרטים בתוך אותו מין. הגיוון בין הפרטים, התפצלותם המודרגת או הפתאומית יחסית – הם המאפשרים הופעת מינים חדשים. בהתגוונו כך עד אין קץ, ביוצרו כך מיליוני מינים חדשים, כבש החי אט אט את כל כדור הארץ שלנו, פלש לכל פינותיו, לכל גומחה אפשרית. המשחק המחוכם והעדין של מנגנונים גנטיים הוא התורם לגיוון זה. המנגנון הראשי הוא המיניות: ממש מכונה לייצור שוני, המיניות הופכת כל אורגניזם לייחודי, פרט לתאומים זהים. היא עושה כל אחד, חיה או אדם, שונה מכל בני מינו החיים, שחיו וקרוב לוודאי גם אלה שיחיו. הגיוון הגנטי, האחראי לעושר המינים של בעלי החיים והצמחים, הוא האחראי גם לעושר של המין האנושי. כי הוא בה בעת התוצאה והכוח המניע של ההתפתחות הביולוגית. הגיוון הוא נכס רב ערך בשביל המין האנושי ככלל, כמו גם לכל אוכלוסייה בפני עצמה. מגוון עצום זה של כשרים גופניים ורוחניים הוא המעניק לאוכלוסיות האדם את גמישותן, את כושרן להיענות לאתגרים משתנים של הסביבה, הוא הנותן להן את כושר ההסתגלות והיצירה. אוכלוסייה המורכבת מפרטים דומים מאוד מבחינה גנטית עלולה ליפול קורבן לתאונה אקראית: מגפה או שינוי פתאומי של תנאי החיים. כל מאמץ המכוון להאחיד את התכונות הביולוגיות – בין אם מתוך רצון ״לשפר״ אותן באמצעות האֶוּגֶניקה, בין אם בניסיון להעדיף תכונות מסוימות, כגון כשרון למתמטיקה או לריצה – הוא התאבדות מבחינה ביולוגית וחסר שחר מבחינה חברתית. בכל הנוגע לחברה ולמין, מה שמקנה לפרט את ערכו הגנטי אינו איכותם הייחודית של הגנים שלו, אלא העובדה שאין לו אותו

קובץ גנים שיש לאחרים – עובדת ייחודו. ההצלחה של המין האנושי נובעת, בין השאר, מגיוונו הביולוגי. לכן, מגוון זה של יצורי אנוש, יש לשמור עליו מכל משמר. מה גם שהמגוון התרבותי, אשר מילא בהתפתחות האנושות תפקיד חשוב עוד יותר מאשר המגוון הגנטי, נמצא כיום מאוים באופן חמור על ידי הדגם שכופָה כיום התרבות התעשייתית.

כל הנתונים החדשים הללו הם במידה רבה פרי הגנטיקה המולקולרית. מאז גילוי הדנ״א על ידי ווטסון וקריק, תופס תחום זה מקום מרכזי בשיטות הפענוח וההסבר שלנו את עולם החי. הגנטיקה מנתחת את תוכנית המתאר של האורגניזם, תוכנית הכלולה בסדרת גנים המועברים בשושלת תאי הנבט ומגדירים את מבנה היצור העתידי. במשך זמן רב התבססה ידיעתנו על אודות המבנה הפנימי על שיטות הגנטיקה הקלאסית, שאפשרה – תוך מעקב אחר התנהגות התכונות לאורך הדורות – לזהות ולמקם את הגנים על מפת הכרומוזומים. ניסויים אלה חייבו למצוא מוטנטים, להרבותם ולהכליא ביניהם בצירופים שונים. שיטות אלה אפשר לישם רק במיקרו-אורגניזמים או ביצורים רב-תאיים קטנים, שמחזור חייהם קצר מאוד. במרוצת עשרים השנים האחרונות הולידו הטכניקות החדשות של הגנטיקה המולקולרית שיטות אנליזה חדשות לחלוטין. האפשרות לשבט את הדנ״א, לרַבּותו, לפענח את הרצף שלו, ביטלה את האילוצים שנכפו על ידי מחזורי הרבייה של האורגניזמים וגם את המגבלות הכרוכות בהרבעה מכוונת. אנליזה גנטית של כל אורגניזם שהוא נעשתה עניין פשוט יחסית. במיוחד של אלה, כגון האדם, שלא ניתן לבצע בהם אנליזה גנטית קלאסית.

הודות לשיטות חדשות אלה התאפשר לעקוב אחר הדרכים שבהן הגנים השתמרו או השתנו במהלך האבולוציה; וגם לבחון כיצד פועלת האבולוציה כשהיא יוצרת מבנים מולקולריים חדשים. אנו מצליחים לזהות את התחבולות העיקריות שמשתמשת בהן האבולוציה כדי ליצור חדש מישן. אפשר לדמותה לבעל מלאכה אשר במשך מיליוני שנים משכלל לאט את יצירתו, מלטש ללא הרף, מקצץ כאן, מאריך שם, ומנצל כל הזדמנות כדי להתאים, להמיר, ליצור.

התפיסות החדשות נוגעות למעמדו של האדם, או יותר נכון למעמדם של בני האדם, אשר כולם קרובים וכולם שונים. הן נוגעות גם ליחסים של האדם עם מינים אחרים, כמו גם לטבעה המשפץ ללא הרף של האבולוציה. כמובן, תמורה עמוקה זו בתפיסתנו את התורשה ואת מושג קרבת המשפחה מתנגשת בהכרח עם השקפות מסורתיות של התרבות המערבית. התנגשות נוספת, אולי אף עזה יותר, מתרחשת בגלל תמונת העולם שמעצבת הביולוגיה החדישה ביחס לרבייה ולמיניות – האפשרות להפריד בין שתי אלה, לפקח על הילודה, להפרות נשים ״באופן מלאכותי״ בזרע מוקפא, לגרום להפריה במבחנה, לאפשר לעובר להתפתח ברחם שאינו של אמו, וכו׳. כי הרבייה והמיניות אינן רק מעוגנות במוקד הוויתם של היצורים החיים. הן נמצאות בדיוק במקום שבו, במין האנושי, התַרבות באה להתחבר אל הטבע.

גם אם האתנולוגים מתווכחים ללא ליאות על מקורו של האיסור על גילוי עריות, הם מסכימים בנוגע לאופיו הכלל-עולמי. ״אם תבקשו עשרה אנתרופולוגים מודרניים״, כותב אלפרד קְרֶבֶּר, ״לציין מוסד חברתי כלל-אנושי, קרוב לוודאי כי תשעה מהם יבחרו באיסור על גילוי עריות; למעשה, כמה מהם כבר הגדירוהו במפורש ככלל-עולמי יחיד.״ (Kroeber, Alfred – “Totem and Taboo in Retrospect”, in **Nature of Culture**, The University of Chicago Press, 1968). כדי להסביר את האיסור על גילוי עריות, היו מהם שהעלו סיבות טבעיות בלבד. אחרים ראו בו תופעה שמקורה תרבותי לחלוטין. כיום רוב האנתרופולוגים תמימי דעים כי איסור זה יכול להיחשב כשייך לטבע כמו גם לתרבות.

בשביל קלוד לוי-שטראוס, זוהי אכן נקודת המפגש בין טבע לתרבות. "במובן אחד, איסור זה שייך לטבע, שכן הוא תנאי כללי של תַּרבות, לכן אין להתפלא על כך שהמאפיין הפורמלי שלו, כלומר היותו אוניברסלי, נולד בהשראת הטבע. אולם במובן אחר, הוא כבר תַּרבות, בהיותו מכפיף תחת מרותו תופעות שמראשיתן כלל אינן כפופות לו." (Lévi-Strauss, Claude – **Structures élémentaires de la parenté**, Paris, Mouton et Companie, 1981, p. 29). בשביל האנתרופולוג, האיסורים על גילוי עריות ועל נשואי חוץ [נישואין מחוץ לשבט, לכת וכו' – exogamy] ממלאים תפקיד חשוב ביותר: הם מגדירים בין בני האדם קשרים שבלעדיהם לא יוכלו להתרומם מעל לרמת הארגון הביולוגי ולהגיע אל הארגון החברתי.

דימוי החיים שיחק מאז ומתמיד תפקיד חשוב במיתולוגיות הגדולות ובדתות הגדולות. כמעט כל התרבויות המסורתיות חשו צורך להאדיר את ערכו של החי. החיים אצלן תמיד יש בהם משהו מכושף. דבק בו מעין פטישיזם. בתכונותיהם של חומרי החיים יש משום נס. הם מופעלים, מושפעים, משתנים. במצעדם השופע תמונות, דימויים, זיקות, יצורים חיים זוכים למעמד מיוחס בעולם. הם מוצָבים באופן מיידי מעל כל הישויות האחרות. תמיד מעניקים להם את המשקל הנכבד ביותר. לצידם, החפצים הדוממים מאבדים כל צבע, כל עניין. מן החפצים אל היצורים, מן האבק אל המחשבה, זהו מִדרג של ערך כמו גם של מורכבוּת. התופעות לא רק יותר מורכבוֹת אצל היצורים החיים. הן גם מושלמות יותר. לאיכות שאין דומה לה צריכה להתאים סיבתיות שאין דומה לה. השלמוּת נעשית עיקרון מסביר. הצורך להאדיר את ערך החיים בכלל ואת אלה של האדם בפרט משקף גם את היחס המיוחד האמור לקשור את היצורים החיים ישירות אל הכוחות השולטים בעולם. כי החיים נחשבים לקדושים. הם מעידים על התערבות אלוהית. רק האלוהות יכולה להעניק חיים, ולכן גם לשלול אותם. תפקידם היחיד של ההורים הוא לבצע את הרצון האלוהי.

כל עוד היה האדם שרוי בבורוּת כמעט מוחלטת בנוגע למנגנונים שביסוד החיים, לא היתה לו ברירה אלא לייחס אותם לכוחות על-טבעיים. אך מאז שהתחלנו להכיר את הריאקציות המעורבות בהם, מרגע שהתחלנו להבחין אפילו באפשרות להתערב ברמה המולקולרית, הערכים הישנים הפכו נושא למחלוקת. הידע החדש הוביל אותנו לערער לא רק על הדימויים המסורתיים אלא גם על הנורמות המבוססות על הערכת יתר קיצונית של כוחות הטבע ועל אופיים המקודש. נעשה יותר ויותר קשה לשמור על כיבוד עקבי וללא פקפוק כלפי התהליכים המתרחשים בטבע.

השיטות של הביולוגיה המולקולרית מאפשרות גישה אל הבסיס החומרי של התורשה. הן מאפשרות לחטט בדנ"א, לקטוע אותו בנקודות מדויקות, לאחות קטעים עם אחרים, בקיצור לבצע במעבדה את אותו סוג של פעלולים שהאבולוציה מעוללת בטבע. דברים שאוסר מחסום המין הביולוגי, מדע הביולוגיה מצליח לממש באמצעיו ברובד עמוק יותר. סוג זה של טיפול, הנושא את הכינוי "הנדסה גנטית", העניק לביולוגיה כלי בעל עוצמה שלא נודעה עד כה. ההנדסה הגנטית מאפשרת גישה ניסויית חדשה לחלוטין לחקירה של בעיות כה מורכבות כהתפתחות העובר, מחלת הסרטן או תפקוד המוח. ההנדסה הגנטית נעשתה היום למכשיר חיוני ברוב התחומים של הביולוגיה הניסויית.

עם זאת, ההנדסה הגנטית מעוררת סערת רגשות ועוינות. היא אפילו הפכה לאחד המקורות הראשיים לחשדנות שרוחשים לביולוגיה. לא כל כך בגלל הסכנות שדובר בהן, שאינן חמורות מאלה שהמדע גבר עליהן מזה זמן רב בניסויים בחיידקים ובנגיפים מחוללי מחלות. אלא בעיקר משום שמפריע לנו הרעיון כי ניתן להוציא גנים מאורגניזם אחד ולהחדירם באחר. הרעיון כי מה

שקרוי "מניפולציות גנטיות" או "דנ"א רֶקומבּינַנטי" (מולקולת דנ"א המכילה קטע [או כמה קטעים] של דנ"א שמקורו בייצור אחר – ובקיצור דנ"א "מהונדס") נראה לנו כנוגע כגובל בעל-טבעי. הוא מעלה מנבכי הזמן מיתוסים מסוימים המעוגנים בחרדות האדם. הוא מפיל עלינו אותה אימה הניעורה בנו למראה מפלצות, מעורר בנו אותה סלידה הקשורה ברעיון של כלאיים, של יצורים שאוחדו שלא כדרך הטבע.

כדי להשתכנע בכך די להתבונן בתמונות יום הדין שנעשו במהלך מאות שנים. על ידי הירונימוס בּוֹש, למשל. הגיהינום שהוא מראה לנו מאוכלס במפלצות המחרידות ביותר שיכול היה לדמיין. ומפלצות אלה, הנוראות ביותר, שתפקידן לענות את החוטאים, הן בדיוק בנות כלאיים שלא נוצרו כדרך הטבע: יצורים כה מבחילים כמו תערובת של דג וכלב, של עכבר וחרק, של אדם וציפור. בשביל בוש, הדרך הטובה ביותר לטעת בנו חרדה היתה לעמת את האנדרלמוסיה בעולם הדמיוני עם הסדר של עולמנו היומיומי. ביעותי לילה נושנים הם אפוא אלה שאותם מעוררים הניסויים של ההנדסה הגנטית. היא מעוררת ידע חורש רע. בדיוק האב-טיפוס של הידע האסור. של הידיעות שאין לרכוש. היא מזכירה את פרומתיאוס שנענש על שגנב את האש שהיתה שמורה לאלים. השערוריה הגדולה ביותר מתחוללת למראה הקלות הבלתי-נסבלת של החיטוט בחומר שהוא בשורש החיים עצמם. כי כה פשוט לשחק עם מה שהוא עדיין הסיפור המופלא ביותר והבעיה המביכה ביותר של העולם הזה: יצירתו של אדם; התהליך אשר עם איחודם של תא זרע וביצית מתניע את חלוקת הביצית, את ייצורם של שניים ואחר כך ארבעה תאים; ואחר כך של כדור קטן של תאים, אחר כך שק קטן; בינתיים, בתוך יצור בכוח זה מופיעים כמה תאים היוצרים בהדרגה מסה קטנה של תאי עצב. ותאים אלה יאפשרו לדבר, לכתוב, לספור, לנגן בכינור, לחצות שדרה בין המכוניות, לצייר, לכתוב ספר. בתוך מסה קטנה זו של תאים כלולים אלגברה ומוזיקה, תחביר וסמנטיקה, גיאומטריה וקונטרפונקט. האם אפשר לדמיין סיפור יותר פנטסטי?

בהנדסה הגנטית מוטחת ההאשמה החמורה ביותר כלפי המדע: כי היא נותנת לביולוגים את הכוח להשפיל ולשעבד את הגוף וגם את נפש האדם. למעשה, הכוח לשנות את בני האדם אינו חדש. מזה כמה אלפי שנים אפשר להפעיל תכנית של ברירה בין בני האדם וליצור שושלות השונות אלו מאלו כמו שכלבים פֶּקינֶזים שונים מכלבי רועים גרמניים או דניים שונים מכלבי בסט. הרבעה וברירה הומצאו למעשה על ידי איכרים בתקופות פרהיסטוריות. זו אומנות ניסיונית שניתן ליישמה בבני אדם לא פחות מאשר בסוסים ובפרות. אולי יישומה בבני אדם אפילו טוב יותר, שכן לגופם אין שום התמחות בהשוואה להתמחויות של סוסים, של ציפורים או של דגים, ובעולם החי הם בעצם במעמד של חובבים. לבני אדם יש מגוון תכונות ניכר, ולכן גם פוטנציאל התפתחותי עצום הפתוח למגוון גדול של אפשרויות ברירה.

לברור בני אדם – לכך בדיוק הטיף דודן של דרווין, האנגלי פרנסיס גלטון, אשר טבע ב-1883 את המלה "אֶוּגניקה", שפירושה המילולי: גנים טובים. "יהיה זה מעשי בהחלט" – כך כתב בספרו
– (Galton, Francis – **Hereditary Genius**, London, McMillan and Company, 1925, p. 1)
"לייצר גזע של אנשים מוכשרים ביותר הודות לנישואים שקולים במשך כמה דורות עוקבים." גלטון היה אדם מוזר. הוא היה ביולוג וסטטיסטיקאי, וניחן בשכל מבריק מאוד. כדי לקבוע בדייקנות את תפקידה ויעילותה של התפילה, הוא השווה את גיל המוות הממוצע של האנשים שלחייהם מתפללים הכי הרבה – מלכי אנגליה – עם זה של אזרחים מן השורה. כיוון שלא מצא כל הבדל, הסיק מכך כי אין כל תועלת בתפילה! גלטון בילה חלק נכבד מחייו בניתוח ובהשוואה של הורשת תכונות מסוימות, גופניות ושכליות, בקרב פרטים שונים ואוכלוסיות שונות. ממחקריו הסיק כי כל התכונות שנחקרו היו תורשתיות: הכישורים השכליים כמו התכונות הגופניות,

הכשרונות כמו הלקות השכלית, השיגעון ואפילו העוני! בעבורו, תהליכי האבולוציה והברירה הטבעית פעלו ללא הפסק, חלקם דוחפים אל ניוונו של המין האנושי, ואחרים אל שיפורו. "תפקידנו אפוא להשתמש בהזדמנויות להתערב, לבלום את הראשונים ולאפשר משחק חופשי לאחרונים." מכאן האֶוּגניקה, המדע של שיפור המין האנושי על ידי מתן סיכויים גדולים יותר ל"גזעים" הטובים ביותר – לדם הטוב ביותר – להתרבות ולגבור על הגזעים הנחותים.

הרעיון לשפר את הרבייה האנושית הוא סיפור ישן. ראשיתו עוד בעת העתיקה. אפלטון רצה להגביל את הלידות אצל העניים, שכן חשב שהם לא כל כך נבונים. בספרטה השליכו ממרומי הצוק את היילודים שוועדה של זקנים פסקה כי היו בעלי מום. גם היום יש תרבויות שאינן מעוניינות בבנות רבות מדי, ובלידה נפטרות מתינוקות ממין נקבה, או לפחות מחלק מהן. האוגניקה השלילית הזו, באמצעות חיסול, מנוגדת לאאוגניקה החיובית, באמצעות ברירה, שמטרתה להוליד את התינוקות המוצלחים ביותר ככל האפשר. למעשה, הרבייה לעולם אינה חופשית לחלוטין. לכל תרבות כלליה שלה האוסרים סוגים מסוימים של התחברות, לעתים תכופות בקשר לגילוי עריות. בחברותינו המערביות אסורים הנישואין בין קרובי משפחה קרובים מדי. ככל שאנו יודעים יותר על מחלות תורשתיות, כן זוכה לחשיבות רבה יותר ה"ייעוץ הגנטי", המבקש להניא זוגות מסוימים מלהתרבות. ההפלות מותרות ביתר קלות. באירופה, שתי השיטות היו בשימוש כדי לנסות לעקור מן השורש את מחלת התַלַסֶמיה. בכפרים היווניים, שבהם קיימת תכיפות רבה של הֶטֶרוֹזיגוֹטים (בהקשר של תלסמיה, הכוונה לאנשים הנושאים גן אחד תקין, וגן אחד פגום הגורם למחלה. ההֶטֶרוזיגוֹט אינו חולה, אך הוא נשא. לגבר ואשה ששניהם נשאים עלול/ה להיוולד תינוק/ת שקיבל/ה מכל אחד מהם את הגן הפגום, ויילוד כזה יהיה חולה. הסיכויים לכך הם 25%.), ובהם הנישואין עדיין מוסדרים תכופות בשידוך, ניסו לבצע אבחונים חשאיים של טרום-נישואין ולמנוע את הנישואין בין הטרוזיגוטים. התוצאה היחידה היתה מניעת נישואין בין כל ההטרוזיגוטים, שעד מהרה זוהו על ידי האוכלוסייה. בסרדיניה ובקפריסין נעשה הניסיון מאוחר יותר, כאשר יכלו לא רק לזהות נשאים הטרוזיגוטיים של המחלה אלא גם לבצע את אבחון בטרם לידה של המחלה. בתרבויות אלה העדיפו להתחתן בחופשיות ולעשות הפלה במקרה של עובר הומוזיגוטי. כתוצאה מכך התמעטו מאוד מקרי המחלה.

בארצות אלה האֶוּגניקה השלילית נראית אפוא יותר נסבלת, יותר שימושית, ודומה שהיא נתקלת בפחות מחסומים מאשר האֶוּגניקה החיובית. ועם זאת, אנשים רבים בעלי כוונות טובות חושבים, כי עם הידע והמיומנות העומדים לרשותנו, בתוך חברה המעלה על נס את זכויות הפרט, ניתן בעיקרון לשפר את הדורות העתידים על ידי נקיטת אמצעים כגון נישואים מבוקרים או "מיועצים" והתאמת מספר הילדים המותרים לכל זוג. יש הממליצים על שימוש בזרע מוקפא שמקורו בתורמים שנבחרו בקפידה. יש אפילו מי שהתרגשו מן הרעיון להשתמש בזרע של חתני פרס נובל! רק מי שלא מכיר את חתני פרס נובל יכול לרצות לרַבּוֹתם כך! אבל איך נברור תכונות מורכבות מאוד הנקבעות על ידי מערכות רב-גֶניות שאינן ידועות כלל? אצל הכלבים או אצל הפרות ידועות התכונות שמבקשים לבחור. אבל אצל בני האדם? חוץ מהגורמים הקובעים את התכונות הפשוטות, המצייתות לחוקי מנדל, אילו גנים ייחשבו כטובים ביותר באופן מוחלט? וכן – כך אמר ברנרד שו – "מה כבר עשו בשבילי הדורות הבאים שעלי לעשות משהו למענם?".

בתחילת המאה העשרים התקבלה יפה האֶוּגניקה של גלטון. רוב הגנטיקאים תמכו בה, ביניהם שמות מהגדולים ביותר: מורגן, פישר, הולדיין, מלר ואחרים. כמה מהם אפילו הִתווּ תכניות שמטרתן לשפר את מאגר הגנים המשותף. באנגליה ובארצות-הברית קמו אגודות לאֶוּגניקה. בארצות-הברית יצאה לדרך תוכנית שמטרתה לעקר כמה אלפי אנשים שהוגדרו "לקויים מבחינה

שכליתי" לאורך תקופה של עשרים שנה. כל אנשי המדע שתמכו באֶוגניקה, שפיתחו את התיאוריה שלה, שהציעו את דרכי השימוש בה, היו ללא ספק בעלי כוונות טובות. הם האמינו בתקפות המדע שלהם. הם רצו להעמידו לשירות האנושות. אבל לא לקחו בחשבון את היטלר!

קשה להאמין כי האידיאולוגיה הגזענית של הנאצים לא ניזונה מרעיונות האֶוגניקה של ראשית המאה, כפי שמראה היטב ספרו של דניאל קֶוולס (Kevles, Daniel – **In the Name of Eugenics**, University of California Press, Berkeley, 1986). אחד התומכים החשובים באֶוגניקה היה הגנטיקאי האמריקני צ׳רלס ב. דייוונפורט (Charles B. Davenport), שייסד את המעבדה של קולד ספרינג הרבור (Cold Spring Harbour) כדי לחקור את האבולוציה של האדם. הוא נמשך מאוד אל רעיונות האֶוגניקה, ורצה להגן על האוכלוסייה הלבנה של ארצות-הברית כנגד מה שהוא חשב כזיהום גנטי על ידי השחורים, הפולנים והאיטלקים. הוא כיהן כנשיא של הפדרציה הבינלאומית של ארגוני האאֶוגניקה. בתפקידו זה הוא ביקש מידידו אויגן פישר, פרופסור לאנתרופולוגיה באוניברסיטת ברלין, חוקר הגנטיקה של האדם הטוב ביותר של גרמניה, לעמוד בראש ועדת המחקר להכלאות בין-גזעיות. פישר היה גם אחד ממחברי ספר ההדרכה על **התורשה האנושית וההיגיינה של הגזעים**, אשר היטלר, בהיותו בכלא, הזין בו את גזענותו. משנבחר כרקטור של אוניברסיטת ברלין, ברך פישר על התערבותו של השלטון בחיי האומה כפי שהתבטא במדיניות ביולוגית של האוכלוסייה, שנועדה לחסל בני אדם נחותים. באותה תקופה השווה קונרד לוֹרֶנץ את סילוקם של פרטים שהם בלתי-חברתיים בגלל ליקויי בריאות לכריתה של גידול סרטני, ניתוח אשר נראה לו קל יותר ופחות מסוכן במקרה הראשון מאשר בשני. מפישר אנו מגיעים אל תלמידו וממשיכו, הפרופסור אוטמר פון פֶרשוּאֶר, מומחה לרפואה פנימית. וממנו אל עוזרו, הרופא הידוע לשמצה יוזף מֶנגֶלֶה, מפקד אס.אס. ורופא במחנה אושוויץ תחת פיקודו של פֶרשוּאֶר.

הגנטיקאי הגרמני בֶּנו מילר-היל הראה היטב כיצד פֶרשוּאֶר ומנגלה עבדו עם טובי המדענים של גרמניה (Müller-Hill, Benno – **Science nazie, science de mort**, Paris, Odile Jacob, 1989). ה"מחקר" כביכול שלהם התנהל במסגרת המוסדות המדעיים הרשמיים. הוא נהנה ממענקים לתכניות מחקר שניתנו על ידי הארגונים המיוחדים לכך. הוא כתב בדוחות סדירים על התקדמות העבודה. הכול התנהל בהתאם לנוהל המדעי הרגיל. מגלטון אל מנגלה אין כל נתק, אין קרע. מן המדען הישר, הבונה תיאוריות במעבדתו, עוברים בלי להרגיש בכך אל הפושע המזריק פורמלין ללבם של תאומים יהודים או צוענים כדי שיוכל לעקור מהם את עיניהם השונות בצבען; או מדביק לילדים חיידקי טיפוס כדי להשוות את התגובה של תאומים שנולדו מביצית מופרית אחת, או משתיים זהים או לא-זהים?

בעידן זה של ההנדסה הגנטית, של תוכנית הגֶנוֹם האנושי, של מחקרים של העובר, של הסוציו-ביולוגיה, אי אפשר לשכוח. אי אפשר לנהוג כאילו כלום לא התרחש במחנות של גרמניה הנאצית. מה שחשוב כאן הוא לא תפקידו של הרופא שעשה את מה שהוא קרא "ניסויים" בתוך המחנות. זה תפקידו של המדען אשר נתן השראה לתיאוריה. זו אחריותם של אלה אשר קידמו את עיקרי הדוקטרינה שעליה התבססה הגרסה הגסה ביותר של דטרמיניזם ביולוגי. בחוכמה שלאחר זמן, קל היום לקבוע כי רוב הרעיונות שסיפקו אשראה לתנועת האֶוגניקה היו חסרי שחר. ועם זאת, רבים מתומכיה היו אנשי מדע מכובדים עד מאוד, שחשבו שהם פועלים לטובת הכלל. אם כן, היכן הטעות?

הטעות היא בכך שאנשים אלה לא שקלו באופן ביקורתי די הצורך את עצם הרעיון של אֶוגניזם ומה שהוא טומן בחובו. במיוחד הם לא העריכו נכונה את תוצאותיו החברתיות. הסכנה הנשקפת

למדען היא שלא יעריך כראוי את גבולות המדע שלו, כלומר את הידע שלו; שיערבב בין מה שהוא מאמין בו לבין מה שהוא יודע. ובעיקר, שיהיה בטוח בצדקתו. הגנטיקאים לא חשפו מספיק את רעיונותיהם האוגניים בפני אנשים שאינם מדענים. הם לא באו במגע מספיק עם שאר החברה לפני שהציעו דוקטרינה שיישומה משפיע בראש ובראשונה על החברה. נוסף לכך, המדענים משתמשים בעבודתם בהפשָטוֹת, במושגים. כדי לבצע את האנליזה שלו, הביולוג נאלץ לעתים קרובות לפרק את האורגניזם שהוא רוצה לחקור. הוא מתעניין ב"אוביקט", ב"מערכת", באבר, ברקמה, בסוג של תא, בחלבון, בגן וכו'. לאוביקט אין כבוד. אין לו זכויות. אפשר לעשות בו מה שרוצים בלי לשאול לדעתו. אין הדבר כך כאשר עובדים עם בני אדם. שום ניסוי, משום סוג, אסור שייעשה באדם בלי הסכמתו. בכל הנסיבות יש לשמור על כבודו ולהתחשב באישיותו של האדם. אפילו בעת שהוא מעמיד את עצמו כנושא המחקר, היצור האנושי חייב להישאר אדם.

היו מי שהציעו שלא לעסוק אלא במחקר "טוב", זה אשר אמור להביא רק תועלת למין האנושי, ולזנוח את המחקר ה"רע", זה שעלול לגרום לו סבל. רק מי שאינו מבין מהו המדע יכול להציע הצעה כזו. המחקר הוא תהליך אינסופי שלעולם אין לצפות כיצד יתפתח. הבלתי-צפוי הוא בעצם טבעו של המפעל המדעי. אם מה שעומדים למצוא הוא באמת חדש, כי אז מעצם הגדרתו הוא משהו בלתי-ידוע מראש. אין כל אמצעי לצפות לאן יוביל תחום מחקר נתון ולכן גם לא ידוע מה יהיו יישומיו האפשריים. לכן אי אפשר לבחור היבטים מסוימים של המחקר ולדחות את האחרים.

יש המציעים הצעה אחרת: לעצור את המחקר בגנטיקה. המציעים זאת חוששים שהוא יפתח דלתות שלא צריך לפתוח. דלתות שמאחוריהן עלול להימצא למשל, משהו שיגביר את המתחים בין הגזעים. זה מזכיר את אדם הראשון או את פרומתיאוס. אולם לא הידע הוא המסוכן, אלא הבורות. נוכח כל ההבדלים התרבותיים, הפוליטיים, הדתיים – שלא לומר המדעיים – השוררים בעולם, קשה לאנשים לדמיין איזה כוח שליט, ובאילו נימוקים, יהיה מסוגל לסגור את כלל מעבדות הגנטיקה בעולם. יתר על כן, זה אומר לא רק לעקור את הגנטיקה ה"רעה" אלא גם את ה"טובה". והרפואה שלנו הרי מבוססת מעתה לא מעט על הגנטיקה. מסיבות אידיאולוגיות בלבד, ותוך זלזול בנתונים מדעיים שהושגו כמעט בכל מקום בעולם במשך למעלה משלושים שנה, החליטו הסובייטים לאחר המלחמה העולם השנייה כי הגנטיקה היא מדע בורגני שיש לחסלו בארצות הקומוניסטיות. לפי צו של סטלין הושלטו התיאוריות המטורפות של ליסנקו במקום הגנטיקה. התוצאות של המעשה הזה ידועות. במשך כמה עשרות שנים נעצרו לחלוטין התפתחות הביולוגיה ויישומיה, בחקלאות כמו ברפואה, בארצות מזרח אירופה, והן עדיין מתאוששות מהמכה גם כיום.

ובכן, באיזו רמה אפשר להפריד ביישומים בין הטוב והרע? האם בריפוי הגנטי, למשל, העומד לפרוח בשנים הבאות? "האמצעי היחיד להיאבק בדֶבר, אמר אלבר קאמי, הוא היושר." (Camus, Albert – **La Peste**, Paris, Gallimard, 1947 בעברית: קאמי, אלבר – **הדֶבֶר**, תרגום אילנה המרמן, עם עובד, 2002). והיושר הוא האמור לאפשר למדען להימנע מהשימוש לרעה במדע שלו. יושר, כאן, משמעו כי המדען מחויב לומר את האמת. אבל את **כל** האמת **ורק** את האמת. בראש ובראשונה, הוא חייב לדבר אל הציבור ולהיות מובן על ידי הציבור. הוא חייב להסביר לבני דורו מה הוא עושה, לאן הגיע המדע שלו, מה חדש, למה יש לצפות, כיצד הרעיון המדאיג במקצת של ריפוי גנטי, האמור לטפל במחלות גנטיות על ידי כך שיספקו לחולים גירסות תקינות של גנים פגומים. הגנטיקאים חייבים להראות את הקשיים ואת התקוות שמביאה עמה טכניקה כזו. עליהם להבליט שני מצבים שונים מאוד: האחד, שבו מוציאים תאים מרקמה חולה, תאי דם,

למשל, ומחדירים לתוכם עותק בריא של הגן הפגום, לפני שמחזירים אל החולה את התאים שלו עצמו שטופלו. טיפול זה בתאי גוף בלבד אינו נבדל אפוא בעיקרון מטיפולים שמשתמשים בהם מזה זמן ברפואה: אברים תותבים, השתלות רקמה, השתלות אברים.

אבל ניתן גם להחדיר גן בצורה כזו שהוא ישתלב בכל תאי הגוף, לרבות תאי הנבט, תאי הרבייה של האדם, שהוא מעביר אל צאצאיו. כאן המצב הרבה יותר מורכב. כי כדי לקבל תוצאה זו צריך להזריק את הדנ״א לביציות המופרות לפני שמתחילה החלוקה. בהכנת עוברים כאלה, הנעשית בהכרח בהפריית מבחנה, אמורים לקבל סדרה של עוברים שביניהם יימצאו תמיד עוברים נורמליים, ללא הגן הפגום. הרבה יותר פשוט אפוא לבחור עוברים בריאים אלה מאשר להזריק לעוברים החולים. ופירושו של דבר שהריפוי הגנטי מיותר בהקשר זה. לעומת זאת, אפשר בטכניקה זו להוסיף תכונה גנטית חדשה, למשל גן שיוכל להעניק יתרונות מסוימים לאנשים. דבר זה כבר נעשה דרך שגרה אצל בעלי חיים וצמחים. אבל בבני אדם המטרה היא אחרת. כאן נוגעים במורשת הגנטית של האנושות. מדובר לא עוד בריפוי האדם אלא בשינויו, בעיצובו. ודומה כי כל הביולוגים מסכימים: יש למנוע זאת בכל מחיר. בכל מקרה, בשאלות שיש להן חשיבות כזו, בשום מקרה אין זו החלטה של המדענים. זה עניינה של החברה. של האזרחים. תפקיד המדען הוא להסביר להם את המצב על כל אפשרויותיו, על יתרונותיו, על סכנותיו. כל זה יכול להיות מוצג בפשטות. ורק כאשר הציבור יבין את הבעיות הקשורות לגנטיקה, יבוא הקץ לפחדו מפני הבלתי-נודע. הטוב ביותר יהיה כי אם אנשים יוכלו לתאר לעצמם את הנושאים האלה ולדון בהם ברבים, כמו שנעשה, למשל, בסוגיות כגון הפלות, המתות חסד או נקיטת אמצעים קיצוניים כדי להחזיק חולים סופניים בחיים.

אך אין זה מספיק לומר את האמת. יש עוד לומר את **כל** האמת. לא לשמור שום דבר בסוד. כאן המדען אחראי במישרין למתרחש. אסור לו להשאיר בצל דבר ממה שמעורר בו חשד ביחס ליישומים ולסכנות אפשריות. במקרה של הריפוי הגנטי, חייבים לתאר את כל הקשיים הכרוכים במשימה ואת כל הסכנות האפשריות. לדבר על וֶקטורים (בהנדסה גנטית, וֶקטור הוא האורגניזם או החלקיק הנושא את הגן המוחדר לתא. בדרך כלל הוֶקטורים הם נגיפים), להראות בבירור את תפקיד הנגיפים המהונדסים. להראות את האפשרות שהדנ״א המוחדר יתיישב ליד מדכא של אונקוגן, מה שעלול לגרום לסרטן. המדען חייב להעריך את הסיכון שנחשפים לו ולהסביר מדוע, נוכח חומרת המחלה ובאין ריפוי אחר, בכל זאת כדאי להסתכן בסיכון זה.

לבסוף, על המדען לומר **אך ורק** את האמת. טעות היא להבטיח נסים ונפלאות כדי לקבל מענקים או כדי להבריק. להניח לאנשים להאמין כי מחר נרפא את כל המחלות. הריפוי הגנטי החל בארצות-הברית בניסיון להתערב בסוגי סרטן מסוימים. לא צריך להניח לציבור להאמין כי במהרה ניתן יהיה לשלוט בכל הגידולים הממאירים. או כי מחלה גנטית נוצחה מרגע שבודד מקטע הדנ״א הגורם לה. לא חשוב לציבור לדעת כי תיאוריה מדעית זו או אחרת – כמו למשל המקור החיידקי של המיטוכונדריה – היא נכונה או לא. מה שחשוב לו, לעומת זאת, הוא לדעת אם אפשר יהיה באמצעות ריפוי גנטי לרפא חולה ממחלת שרירים על-שם דושן (Myopathie de Duchesne) או מציסטיק פיברוזיס; כשם שחשוב לו גם לדעת אם הכשרים השכליים של בני אדם מתנהגים כמו תכונות מנדליאניות פשוטות, או לא. האם הם נקבעים בדרך ביולוגית או לא. המדען חייב להיות זהיר במיוחד בדבריו כאשר הוא מתקדם בתחום שיש לו תוצאות חברתיות עצומות. עליו להראות בבהירות את גבולות האנליזה הגנטית בלי להקיש לגבי תחום שבו אין הוא מכיר את כל המרכיבים.

אנו נישאר לנצח הקורבנות של זאוס ופנדורה. בכלאו את כל הרעות בתיבה שפנדורה עמדה לפתוח, הכריח זאוס את האנושות להיאבק כדי לשרוד; להפעיל את הדמיון ואת התושייה כדי להתגונן מפני הקור, הרעב, המחלה והסכנות השונות. הוא גזר על יצורי האנוש חיפוש שלעולם לא יהיה לו סוף.

פרק שביעי – היפה והאמיתי

"אם תרצה לדעת כיצד מתפקדים המדענים," היה איינשטיין נוהג לומר, "אל תקשיב למה שהם אומרים. הבט במה שהם עושים." (Einstein, Albert – "On the Method of Theoretical Physics", in **The World as I See It**, New York, 1934, p. 30). רוב בני האדם רואים במחקר המדעי תהליך הגיוני טהור. הם מעריכים אותו כפעילות קרה וקפדנית. קרה וקפדנית כשם שהיא נראית בספרי ההדרכה של המדע או בספרי פילוסופיה של המדע. מצד אחד, הפילוסופים מתארים בלי סוף את השיטה ההיפותטית-דדוקטיבית (מַשְׁערת-מֵסיקה). הם מנתחים בפירוט את תהליך הגילוי. הם דנים בהוכחה ובהפרכה. הם מדברים על אמת ו"סבירות". מצד אחר, המדענים מתארים את פעילותם שלהם כרצף מסודר היטב של רעיונות וניסויים המתחברים בסדר הגיוני חמור. במאמרים המדעיים, התבונה פוסעת בדרך המלך, המובילה מן האפלה אל האור. אף לא טעות כלשהי, אף לא שיפוט מוטעה. שום מבוכה. אך ורק טיעון מושלם, ללא דופי.

ולמרות זאת, כאשר בוחנים מקרוב "מה עושים המדענים", מופתעים להיווכח כי המחקר כולל למעשה שני פנים, שסופר טוב כינה אותם מדע של יום ומדע של לילה. המדע של יום משתמש בטיעונים המשתלבים כמו גלגלי שיניים, בתוצאות בעלות עוצמה של ודאות. אנו מתפעלים מן הסדר הנשגב, כמו זה שיש בתמונה של דה וינצ'י או בפוגה של באך. אנו מטיילים בו כמו בגן צרפתי. מודע לדרכו, גאה בעברו, בטוח בעתידו, המדע של יום מתקדם באור התהילה.

המדע של לילה, לעומת זאת, תועה כמגשש באפלה. הוא מהסס, מועד, נסוג, מזיע, מתעורר בחלחלה. בהטילו ספק בכול, הוא מחפש את עצמו, שואל את עצמו, מתקן את עצמו ללא הרף. זו מעין סדנה של האפשרי, שבה מתגבש מה שיהפוך להיות חומר הבנייה של המדע; שבה ההשערות נותרות בגדר נבואות לב עמומות, תחושות מעורפלות; שבה התופעות עדיין אינן אלא אירועים בודדים ללא קשר ביניהם; שבה תוכניות הניסויים בקושי לבשו צורה; שבה המחשבה משתרכת בדרכים עקלקלות, בסמטאות פתלתלות, לעתים תכופות ללא מוצא. נתון לחסדי המקרה, השכל משוטט במבוך, תחת מבול של מסרים, בחפשו אחר אות, אחר ניד עפעף, קישור בלתי-צפוי. כמו אסיר בתאו, הוא סובב במעגל, מחפש מוצא, קרן אור. בלי הרף הוא מְטלטל בין תקווה למפח-נפש, בין התרוממות רוח למרה שחורה. אין דבר שיעיד כי המדע של לילה יעבור אי-פעם לשלב המדע של יום, כי האסיר יֵצא מן האפלה. אם זה קורה לפתע, נעשה הדבר באקראי, במעין גחמה. בהיסח הדעת, כמו לידה טבעית. במקום כלשהו, בזמן כלשהו, כמו רעם ביום בהיר. מה שמדריך אז את השכל אינו ההיגיון. זה האינסטינקט, האינטואיציה. זה הצורך לראות בבהירות. זו הדבקות בחיים. בדו-שיח הפנימי האינסופי, בין אין-ספור השערות, השוואות, צירופים וקישורים החולפים במחשבה ללא הפסק, לפעמים חץ של אש קורע את האפלה; מאיר לפתע את הנוף באור מסנוור, מבעית, חזק מאלף שמשות. לאחר ההלם הראשון מתחיל מאבק קשה עם הרגלי החשיבה; התנצחות עם מכלול המושגים השולטים בדרכי החשיבה שלנו. דבר אינו מאפשר עדיין לומר אם

השערה החדשה תתקדם מעבר למתווה הגולמי הראשוני, תתעדן, תתחדד ותשתפר. אם תעמוד במבחן ההיגיון. אם תתקבל כמדע של יום.

כאשר הוא מתיישב לכתוב מאמר כדי לפרסם את תוצאת עבודתו, המדען, ביודעין או שלא ביודעין, שוכח את המדע של לילה ואינו מדבר עוד אלא במדע של יום. עליו לארגן המון נתונים שנאספו במשך חודשים ושנים. לשַוות להם צורה שיוכל להפיק ממנה סיפור הגיוני, וסיפור זה יהפוך לדוח הרשמי של מחקר. הסיפור חייב להיות חזק ומעורר אמון כדי לשכנע את העמיתים. כדי לגרום להם לאמץ את נקודת הראות שלו, ואפילו כדי לשפוך אור על מחקרם שלהם.

תרגיל מוזר באמת. המדע הוא קודם כול עולם של רעיונות בתנועה. לכתוב דוח של מחקר, הרי זה לאַבֵּן את הרעיונות הללו; להקפיאם; כאילו לתאר מרוץ סוסים בצילום יחיד. הכתיבה משנה את עצם טבעו של המחקר; היא כופה עליו צורה פורמלית. היא מציבה מצעד מסודר של מושגים וניסויים במקום אנדרלמוסיה של מאמצים פרועים, ניסיונות שנולדו מתוך התעקשות להבין טוב יותר. אבל גם אנדרלמוסיה של חזיונות, של חלומות, של קישורים בלתי-צפויים, של פשטנות ילדותית לעתים, של גישושים באקראי, בכל הכיוונים, מבלי לדעת באמת לאן זה יגיע. בקיצור, אי-הסדר והריגוש המפיחים חיים במעבדה. ובכל זאת, ככל שהפרשיה מתקדמת, גובר הפיתוי לנסות לברר מה היה חלקו של המקרה ומה היה חלקה של האשראה. אלא שכדי שעבודה תתקבל, כדי שתאומץ דרך חשיבה חדשה, יש לטהר את המחקר מכל הסיגים הרגשיים, הלא-הגיוניים; לסלק ממנו כל סממן אישי, כל ניחוח אנושי. ללכת בדרך המלך המובילה מן הנעורים המגמגמים אל הבגרות הבשלה. להחליף את הסדר האמיתי של האירועים, של התגליות, במה שאמור להיות הסדר ההגיוני, זה שהיה עלינו להתקדם לפיו אילו היתה התוצאה ידועה מלכתחילה. יש מעין נוהל טקסי קבוע בדרך הצגת התוצאות המדעיות. כך בערך היו נכתבים תולדותיה של מלחמה אילו הסתמכו על הודעות המטה הכללי בלבד.

המדעים בצורתם המודרנית נוסדו בסוף הרנסנס. היה זה בתקופה שבה האדם המערבי שינה את יחסו אל העולם מן היסוד, שבה הוא השתדל להשתמש טוב יותר בעדות של חושיו כדי לבנות את היקום אשר סביבו. הרי בתקופת הרנסנס התחוללה תפנית עמוקה גם באמנות המערבית שפנתה אל דרך חדשה ושונה עד מאוד מן האחרות. בתוך כמה דורות, עם המצאת התאורה והפרספקטיבה, הביטוי והעומק, שינתה אירופה את עצם תפקידו של הציור. עד אז הוא סימל. מכאן ואילך הוא מייצג.

כאשר מבקרים במוזיאון, מבחינים ברצף של ניסיונות עוקבים המזכירים את אלה של המדע. הציירים, החל מן הפרימיטיביים ועד ציירי הבארוק, לא פסקו מעולם מלשכלל את אמצעי הייצוג שלהם, מניסיונם להראות את היצורים ואת העצמים בנאמנות גדולה ככל האפשר תוך שימוש באשליות חזותיות; הם פיתחו עולם חדש לחלוטין, עולם פתוח מכל צדדיו. יש נתק ממשי בין מדונה של צ'ימַבּוּאֶה (Cimabue), קפואה בצעיפיה מול נוף סמלי, לבין אישה של טיציאן, שרועה חופשית ועירומה על מיטתה. נתק זה מקביל לנתק המבדיל בין העולם הסגור של ימי הביניים לבין היקום האינסופי המתואר על ידי ג'ורדנו ברונו. למעשה, התמורה שנצפתה בציור שיקפה את המהפכה הכללית שהביאו הכיבוש הפוליטי של התבל ותמונת העולם החדשה שהחל ליצור לו האדם המערבי. בין המאה ה-13 והתקופה הקלאסית שינתה אירופה את כל פועלו של האדם. לא רק שהסימבוליזם הומר בייצוג, אלא גם החדקוליות ברבקוליות, התפילה בפעולה, המיסטֶריה בדרמה, הסיפור ברומן, הכרוניקה בהיסטוריה והמיתוס בתיאוריה המדעית. גם אין לשכוח כי התפתחות המדע המודרני היתה אפשרית במידה רבה הודות למבנה של המיתוס היהודי-נוצרי,

המושתת על הדוקטרינה של סדר השולט ביקום שנברא על ידי אלוהים. והאלהים עצמו אינו חלק מן הטבע, אלא מושל בו באמצעות חוקים הניתנים להבנה על ידי השכל האנושי.

מבחינה מסוימת מדעים ומיתוסים ממלאים תפקידים דומים. שניהם עונים על צורך של רוח האדם, בספקם לו תמונה של העולם ושל הכוחות השולטים בו. כדי לא לעורר חרדה ופיצול אישיות, חייבת תמונה זו להיות אחידה ולכידה. ובמה שנוגע לאחדות וללכידות, אין כל ספק כי המדע אינו משתווה למיתוס. דומה שהמדע הרבה פחות שאפתני. אין הוא מבקש להסביר הכול לאלתר. הוא מגביל את עצמו לשאלות מוגדרות. הוא מתייחס לתופעות מוגבלות, שאותן הוא משתדל להסביר באמצעות ניסויים מפורטים. הוא יודע היום כי תשובותיו אינן יכולות להיות אלא חלקיות וארעיות.

לעומת זאת, מערכות ההסבר האחרות – מאגיה, מיתוס, דת – שואפות לאוניברסליות. יש להן תשובה לכל השאלות, בכל התחומים. ללא היסוס, הן מתארות לא רק את מצבו הנוכחי של העולם אלא גם את מקורו ואפילו את עתידו. נכון, אנשים רבים אינם מקבלים את סוג ההסבר שמספקים המאגיה או המיתוס. אך מי יוכל להכחיש כי יש בהם לכידות ואחידות, שהרי הם אינם מהססים להשתמש מראש בנימוק אחד ויחיד כדי לתרץ כל שאלה שהיא ולפתור כל קושי שהוא? על אף היותן שונות מאוד, כל מערכות ההסבר, המאגיה כמו המיתוס או המדע, פועלות על פי אותו עיקרון. מדובר תמיד, אמר ז'אן פרן (Perrin, Jean – **Les Atomes**, Paris, Alcan, 1914) בהסבר העולם הנראה באמצעות כוחות בלתי-נראים; בביאור מה שמתבוננים בו על ידי מה שמדמיינים. לאנשים מסוימים הברק מבטא את זעמו של זאוס; לאחרים, הוא הבדל מתח חשמלי בין האדמה לעננים. מחלה היא, לפי אנשים מסוימים, תוצאה של מזל ביש; לאחרים, היא זיהום על ידי חיידק או נגיף. אבל בכל המקרים התופעה שמדובר בה נתפסת כתולדה נראית של סיבה נסתרת השייכת למערכת בלתי-נראית של כוחות הידועים כמושלים בעולם.

כפי שכבר נאמר לעיל, המדע נראה במבט ראשון פחות נועז מן המיתוסים, הן בשאלותיו והן בתשובותיו. חושבים תכופות כי המדע המודרני החל באמת כאשר במקום לשאול: מאין בא העולם? ממה עשוי החומר? מה הם החיים? שאלו: כיצד מתרחשת נפילת אבן? כיצד זורמים המים בצינור? כיצד זורם הדם בגוף? והשינוי היה מפתיע. השאלות הכלליות לא הובילו מעולם אלא לתשובות מוגבלות. ולהפך, השאלות המוגבלות התגלו כמובילות לתשובות יותר ויותר כלליות.

תמונת העולם שיוצר לו האדם יכולה אמנם להיות ממקור מדעי או מיתי, אך היא תמיד נזקקת במידה רבה לדמיון. לעתים תכופות חושבים כי כדי להגשים יצירה מדעית די לצְפות ולצבור תוצאות ניסויים כדי שתצמח מזה תיאוריה. אין זה כך כלל וכלל. אפשר בהחלט לעיין בנושא מכל זוויותיו במשך שנים מבלי שיצא מזה כל רעיון בעל עניין מדעי כלשהו. לא ניתן להגיע לרעיון בעל ערך כלשהו בלי שיהיה לך מלכתחילה מושג מסוים ביחס לשאלה במה יש להתבונן. השתלשלותה של בעיה מדעית נובעת לעתים תכופות מהיבט בלתי-נודע של הדברים המתגלה לפתע; לא בהכרח עם הגיעו של מכשיר חדש, אלא הודות לדרך חדשה לבחון את העצמים, לראותם מזווית בלתי-צפויה, במבט חדש; מבט המודרך תמיד על ידי השקפה על מה שאמורה, מה שיכולה להיות ה"מציאות". אין התבוננות מועילה בלי רעיון כלשהו על הבלתי-נודע, על התחום המצוי מעבר למה שהניסיון והעיון מרשים לחשוב. כפי שמדגיש פטר מֶדָבָר (Medawar, Peter – **The Hope of Progress**, New York, Doubleday, 1973), החקירה המדעית מתחילה תמיד בהמצאת עולם אפשרי, או בקטע של עולם אפשרי.

זו גם הדרך שבה מתחילה החשיבה המיתית. אלא שזו אינה מרחיקה לכת. היא מקימה את מה שנראה לה לא רק הטוב בעולמות אלא גם היחיד האפשרי. לאחר מכן היא מציבה ללא קושי

את המציאות במסגרת שיצרה. כל אירוע נעשה אז לאות מטעם הכוחות השולטים בעולם, ומעצם היותו כזה הוא מוכיח את קיומם ואת תפקידם. בגישה המדעית, לעומת זאת, הדמיון אינו מתפקד אלא בהתחלת התהליך. לאחר מכן עליו להטיל ספק בעצמו; להיחשף לניסוי, לביקורת, להפרכה, בקיצור, להגביל את חלקו של החלום בתמונת העולם שהוא בונה. המדע מסוגל לדמיין עולמות אפשריים רבים. אולם היחיד המעניין אותו הוא זה הקיים, זה אשר מזה זמן רב עמד במבחן. כדי לא לתת ל"כוח הדמיון" להשתולל, התהליך המדעי משמעו לעמת ללא הרף את מה שעשוי היה להיות עם מה שיש.

בעולם המערבי פרחו מדעים ואומנויות כמעט תמיד יחדיו בזמן ובמרחב. יש לפעמים אפילו מפגשים מפתיעים בין היבטים מסוימים של האומנויות ושל המדעים. למשל, בין הספרות ומחקר עולם החי, מאז סוף הרנסנס ועד המהפכה הרומנטית. מה שקרוי "העידן הקלאסי" – המאה ה-17 – ידוע קודם כול כתקופת הייצוג, כלומר של חקר הצורות וארגונן בכל התחומים. זה נוגע לצורות הנראות, כמובן; בציור, שבו מוצאים את סמל הייצוג ב**נערי החצר** של ולסקז, "הייצוג של הייצוג", לפי ביטויו של מישל פוקו (Foucault, Michel – **Les Mots et les Choses**, Paris, Gallimard, 1996). בתמונות דתיות מסוימות אנו עדים אפילו לכך שהמסתכלים מבטאים בהתנהגותם אמונה במציאות וביעילות של מה שהוצג שם כאילו מדובר בשרידי קדושה אמיתיים. הוא הדבר לגבי צורות מוזיקליות, או צורות מילוליות, מעת שהוגדרו אמצעי הלשון ומנותחים מבני הדיבור. התיאטרון, קומדיה או טרגדיה, הוא אחת מצורות הביטוי הספרותי העיקריות באותה תקופה. שקספיר, מולייר, ראסין, קלדרון, מתארים ביצירותיהם מגוון דמויות הנתפסות בהתאם להתנהגותן, לפי מה שרואים ושומעים. באותה עת, מדעי הטבע משתדלים למיין צמחים ובעלי-חיים לפי מבניהם הנראים לעין, לפי מה שרואים על פני השטח. בשני המקרים הניתוח מתבסס על המעטפת החיצונית של היצורים, על מה שרואים מבחוץ. לקראת סוף המאה ה-18 מתרחש שינוי מוחלט של זווית הראייה. בשני התחומים, מרכז ההתעניינות עובר פנימה, אם אפשר לומר כך. מצד אחד, משוררים וסופרים, המייצגים את הזרם הספרותי הראשי, מתחילים לדבר על עצמם, לתאר את דמויותיהם מבפנים. הם מעתיקים את מרכז הכובד. הם מבטאים הלכי נפש. מצד שני, אנשי מדעי הטבע מתחילים להתעניין בתכונות המשותפות לכל היצורים החיים. מתחת לפני השטח הנראים של החיות, הם מבחינים בקיומו של "ארגון" השולט בקשרים שבין החלקים ומכריח את האברים לשתף פעולה ולתאם ביניהם את התפקודים החיוניים. הם מדברים על החיים ומשתדלים להגדיר את מה שמבחין אותם מן המוות. מפליא להיווכח כי המלה "ביולוגיה" מופיעה במקביל בכמה מקומות, בדיוק בזמן של ההתאבדות הראשונה בספרות: זו של ורתר הצעיר.

בסוף המאה ה-19 מסתמן עוד שינוי, שיעצב את המחשבה המערבית בהיבטיה המגוונים ביותר ויזעזע את הסדר הקיים. אפילו ה"אני" נפגע כאשר הפסיכואנליזה הפרוידיאנית מבקעת את האישיות, מפרקת אותה לגורמים, כביכול; כאשר היא הופכת לבלתי-אפשרית כל היעזרות פשוטה וישירה בעיון ובהיגיון כדי להסביר את האישיות הנעשית רב-צדדית; הנראית לה עצמה יותר ויותר מסתורית. בספרות, עצם מעמדה של הלשון מוטל בספק, בעיקר כאשר המשורר סטפן מַלַרמֶה מדבר על נתק בין המלה והדבר שאליו היא מתייחסת. המלה וֶרֶד, למשל, שאין לה לא צבע, לא ריח ולא קוצים. היא לא פורחת. לא ניתן לקטוף אותה. היא רק סימן, שאין לו דבר עם הפרח שהוא מייצג. ובדיוק הריק הזה, אותה "היעדרות של הדבר", כפי שאומר מלרמה, הוא המעניק ללשון את גמישותה ואת עוצמתה. משום שהמלה לחלוטין מופרדת ממה שאליו היא

מתייחסת, היא יכולה לפעול עם כל המלים האחרות, להתחבר אתן באין סוף משפטים המהווים את השפה.

המודעות לריק בלב השפה פתחה כך קרע במשמעותה, ביחסה אל המלאות של העולם. ומכאן נולד מעין חוסר איזון, אי-יציבות אשר תוביל אל שינויים מעמיקים באומנויות של המאה העשרים. בספרות, עם הניסיונות שמטרתם להשתחרר מהכתיבה המקובלת והרגליה, זה יוביל אל האבסורד של האקזיסטנציאליסטים ואל הניהיליזם של בֶּקֶט. בציור, עם הרס התצוגה הקלאסית והתפוצצות הצבע, אל הסוריאליזם ואל הציור המופשט. במוזיקה, עם חיסול הלחן, החזרה והסדירות, זה יביא לביטול המֶשך והציפייה.

במדעים לא נראה סוף המאה ה-19 פחות הרסני במה שנוגע לדרכי החשיבה הישנות. לא אתאר כאן את מה שכולם יודעים: הקשיים שנתקל בהם הדטרמיניזם הקשוח ששלט מאז ניוטון ולַפּלַס; את אי-האפשרות לצפות אירועים מסוימים, כמו ההתנהגות של מולקולת גז או הגנוטיפ של אדם עתידי, שני דברים המוסברים רק על ידי אנליזה סטטיסטית של אוכלוסיות גדולות; את תפקידה של ההיסטוריה, ולפיכך של המקרה, בהתפתחות הדברים המורכבים, בעיקר בעולם החי, אך גם בעולם הדומם. המאה העשרים תציב גבולות חדשים ליכולתנו להצרין ולחזות, מה שמתבטא בשורה של מלים: אי-יציבות, תוהו ובוהו, יחסיות, קוונטים, ספקנות, הססנות, מלים שבהן מתייחס הצופה אל התופעה הנצפית. וכך, הנתק בין הדטרמיניזם האדוק למהלך העיוור של האבולוציה תואמים במדעים להתמוטטות המשמעות, הצורות, הנהירות באומנויות.

דומה שדוגמאות אלה מציינות כי ברגעים מסוימים של ההיסטוריה ושל תרבות, קיים מעין הד בין הדרך שבה אמנים ומדענים מנתבים את המחשבות והדימויים שבהם הם משתמשים. כאילו איזה כוח הטה לאותו כיוון את המאמצים של כולם. ועם זאת, קשה מאוד לנתח הקבלות כאלה. מה שאפשרי בתחומים שונים מוגבל תכופות על ידי מגוון הדעות המהלכות, מסכת האמונות, הידיעות והגישות, המאפיינות תרבות בתקופה נתונה. מסכת אשר לעולם אינה מאורגנת בדרך הגיונית לחלוטין; שאינה מהווה מערכת עקיבה לגמרי. כי האמונות הקיימות ברגע כלשהו מצויות לעתים רחוקות בתיאום מוחלט. הן לרוב עצמאיות, אם לא סותרות. כיצד, למשל, נגשר הגיונית בין התורה של הרצון החופשי לזו של הגורל, או של כיוון ההיסטוריה? או גם בין הרעיון כי יצירת אומנות מבטאת את החלק היותר אינטימי, היותר אישי של הפרט לבין ההכרה כי יש לה בה בעת ערך אוניברסלי? האמונות המושרשות במעמקיה של תרבות, לעתים קרובות אין להן כל בסיס הגיוני. הן לא אומצו במודע. וזה חל עד המושגים היסודיים ביותר, על מושגי הזמן, המרחב, הסיבתיות, המדריכים את תפישותינו ומנחים את התמונה שיש לנו על העולם ועל עצמנו.

בין אם היא חברתית או אינטלקטואלית, בין אם תתרחש בפוליטיקה, באמנות או במדע, כל מהפכה תובעת קודם כל הזזה של האפשרי, ארגון מחדש של מערכת האמונות. אולם המקור של שינויים אלה לעתים תכופות קשה לזיהוי. הקשרים בין רעיונות לתרבויות, בין אמונות למעשים, לעולם אינם תהליך חד-כיווני. זו תמיד מערכת מורכבת של יחסי גומלין. התעתוע האינסופי של הביצה והתרנגולת.

מה שעושה מדען אינו נקבע אפוא רק על ידי ראיית העולם שלו, אלא גם על ידי זו של תקופתו. כאשר מסתכלים בכתבים המדעיים של תקופה נתונה, מופתעים לגלות כי כולם מדברים על אותם דברים ואומרים עליהם בערך אותו דבר, אפילו הללו המצויים באי-הסכמה מוחלטת אלה עם האחרים. זה נכון גם לגבי האמנים. כדי להשתכנע בכך, די להאזין לקטעים שונים של מוזיקה מן הבארוק, אשר לכולם דמיון רב ביניהם; או לבקר במוזיאון כדי להיווכח כי במאה ה-16 כל

הציירים ההולנדיים ציירו את אותו נוף; ובמאה ה-19 כל הציירים האנגליים ציירו את אותם דיוקנים של אותן נשים.

"דבר אינו יפה כמו האמת", קובע ניקולה בּוָאלוֹ באחת מאגרותיו. "אין אמיתי אלא היפה", מאשר אנטול פראנס ב**החיים הספרותיים**. וג'ון קיטס, **באודה אל אגרטל יווני**, מפליג מעבר לכך: "היפה הוא האמיתי, האמיתי הוא היפה". אם יש יופי במלים אלה, אפשר לתהות על אמיתותן. המדעים מבקשים לבנות תמונת עולם קרובה ככל האפשר אל מה שקוראים המציאות. זה מפעל משותף בזמן ובמרחב. האמנויות שואפות ליצור בבואות של העולם, שכל אחת מהן מבטאת את המבט האישי של מציאות כפי שהיא נתפסת או מדומיינת או נחלמת. זה לרוב מפעל אישי. מה שאמיתי, עם זאת, הוא כי יופי ואמת משתנים עם התרבויות, ובתוך אותה תרבות, עם הזמן. היחס בין אמת ליופי, או באופן כללי יותר, בין מדע לאמנות, הוא נושא ישן, תמיד קשה לטיפול. יש הבדלים מובהקים, שכבר דובר בהם רבות. הם סובבים סביב שני נושאים עיקריים:

1. העבודה המדעית קשורה הדוקות אל רעיון הקִדמה, בעוד שבאמנות אין כלל דבר דומה לזה. יצירת אמנות באמת "מושלמת" לעולם לא תהיה מיושנת; היא לא תזדקן לעולם, בעוד אשר במדע כל אחד יודע כי יצירתו תהא די מהר משהו שנותר מאחור. זאת משום שכל יצירה מדעית מולידה שאלות חדשות; כך הדבר מעצם תפקידה. במלים אחרות, בטהובן אינו עולה על באך, ופיקסו אינו עולה על רמברנדט באותו אופן שאיינשטיין מתעלה על ניוטון. מה שוויקטור הוגו מסכם כך: "פסקל המדען מיושן; פסקל הסופר לא." עם זאת, כפי שהדגיש בצדק גינטר סטנט (Stent, Gunther – "Prematurity and Uniqueness in Scientific Discovery", **Scientific American**, 1972, (6), pp. 84-93), משווים כאן את שאינו ניתן להשוואה: מצד אחד יצירת אמנות, מצד שני **התוכן** של יצירה מדעית. תמונה, רומן, הם יצירות אמנות. תיאוריה מדעית, לעומת זאת, אינה יצירה מדעית, אלא התוכן של יצירה כמו ספר, מאמר, הרצאה וכו'. ביצירה כמו רומן, ההתאמה בין הנושא והצורה, בין התוכן ובין הסגנון, היא המעניקה ליצירה את ערכה. לא ניתן להפריד אותם זה מזה. חשיבות התוכן יכולה אפילו, בשירה למשל, לִפחות עד כדי כך שהאופי האסתטי של היצירה נותר לבסוף טמון אך ורק בקצב, במוזיקה של המלים. במדע, לעומת זאת, התוכן כמעט לבדו הוא המעניק לעבודה את ערכה. והתוכן של מאמר או ספר מדעי יכול לעתים תכופות להסתכם בכמה משפטים.

2. הבדל שני שנוהגים לעתים תכופות להדגיש בין אמנות ומדע: המדען מתאר את העולם החיצון, שבו לעצמים ולמאורעות יש קיום שאינו תלוי ברוח האדם. העצמים והחוקים קיימים. תפקיד המדען הוא רק לגלותם; לקטוף אותם כמו תפוחים מהעץ; לחשוף אותם, כמו שחושפים פסל ביום חנוכתו. האמן, לעומת זאת, מתאר עולם פנימי שבו לעצמים או למאורעות אין כל מוחשיות, אלא הם מופיעים כסתם יצירות של רוח האדם. תפקיד האמן הוא אם כן ליצור עצמים חדשים הנובעים לחלוטין מתוך רוחו, כמו אתֵנה היוצאת מראשו של יופיטר מצוידת מכף רגל עד ראש. **אותלו** הוא אפוא יצירה. מבנה האטום הוא תגלית. ומכאן הבדל בתפקיד הפרט. היוצר של יצירת אמנות הוא ייחודי, בלתי-חליף. מחולל התגלית הוא חליף. ללא גוסטב פְלוֹבֶּר אין **מדם בובארי**. בלי מוצרט אין **חליל הקסם**. לעומת זאת, אם תגלית זו או אחרת לא היתה נעשית בידי פרופסור א', היא היתה יכולה להיעשות על ידי דוקטור ב', אפילו מר ג', או מר ד'. אם לא ניוטון, היה נמצא פיזיקאי אחר כדי לגלות את כוח הכבידה. אם לא דרווין, ואלאס היה מציע את תורת ההתפתחות. רוב המדענים מסכימים עם נקודת ראות זו. הם לא משתמשים כמעט אף פעם במלים "יצירה" או "יצירתיות" כדי לתאר את פעילותם. הם

עצמם חושבים כי הם עוסקים קודם כל בעובדות, כי הם מגלים תופעות, כי הם חושפים עצמים טבעיים. אשר להדיוט, הוא חושב כי המדע אך ורק רושם את העובדות, כשם שהמצלמה מצלמת תמונות של סביבתה.

ועם זאת, המוח שלנו אינו פועל כך. המוח התפתח בוודאי בהשפעת גורמים מגוונים ומורכבים מאוד, לרבות היכולת ליצור תמונה של העולם החיצוני. דרך היצורים החיים עובר זרם משולש, של חומר, אנרגיה ומידע. רק כך הם יכולים לחיות, לגדול ולהתרבות. לאורגניזם יש אפוא צורך מוחלט לתפוס את סביבתו, או לפחות את ההיבטים של סביבה זו הקשורים לצרכיו החיוניים. עם ההתפתחות מתעדנת התפיסה ומתעשר המידע שהאורגניזם יכול לאסוף. כך יש לכל יצור ציוד חושי המאפשר לו לתפוס היבטים מסוימים של העולם החיצוני. כל מין נע, אם אפשר לומר כך, בעולם חושי ייחודי, שממנו מנועים, חלקית או לחלוטין, המינים האחרים. העולם החיצוני, כפי שתופס אותו כל מין, הוא פועל יוצא של אברי החישה שלו, כמו גם של הדרך שבה אירועי החישה והניעה משולבים במוחו. כל יצור אינו מגלה לעולם אלא חלק של סביבתו, וחלק זה ייחודי ליצור זה. כל זה נכון גם לגבינו. אנו עצמנו נשארים מסוגרים בתוך תמונת העולם שכופה עלינו המערכת העצבית והחושית שלנו; כדי כך שאיננו יכולים לראות עולם זה בדרך שונה. אין לנו אמצעים, למשל, לתפוס או אפילו לדמיין, את העולם שבתוכו חיים זבוב או שלשול או שחף.

במקרה של היונקים, התפיסות החזותיות והשמיעתיות השתלבו באמצעות צופן מרחבי וזמני המאפשר לנו לקשר את גירויי הצליל והאור למקורות משותפים המתקיימים בזמן ובמרחב. בשעות הערות מגיעה באמצעות החושים כמות עצומה של מידע אל מוחו של יונק עילאי. אם כמות מידע זו יכולה להיות מטופלת על ידי המוח, הרי זה משום שהיא מאורגנת בגושים, בגופים היוצרים את ה"עצמים" של העולם המרחבי-זמני של היצור. זאת גם משום שזיהוי של עצם יכול להישמר למרות תפיסה שאינה חדלה להשתנות במרחב ובזמן. גושים אלה, עצמים אלה, הם בשביל היצור היסודות של ניסיונו היומיומי.

אף שהמוח האנושי הוא המורכב ביותר, ברור כי אין הוא מתפקד על ידי סתם רישום של הטבע. אילו היו חושינו צריכים לספק לנו תמונה שלמה של העולם החיצוני, היינו פשוט מוצפים לחלוטין. המוח מחפש סדירויות בטבע. האותות המגיעים אלינו באמצעות חושינו מאורגנים בצורה המקנה להם מבנה. העין, למשל, אינה מכונה המעבירה אל המוח בדיוק את מה שהיא רואה. במהלך עשרים או שלושים השנים האחרונות הוכיחו הנוירו-ביולוגים כי היא מרושתת באופן המאפשר לה להבחין בגבולות, בניגודי אור, בהבדלי צבעים וכו'. בכל מסירת מידע בין העין והמוח האותות הנקלטים נבררים ומוסדרים לפי מבנים המוכתבים על ידי מערכת העצבים. כל שלב כרוך אפוא בהרס בררני של מידע. תהליך זה של אינטגרציה של המידע הוא המכשיר אותנו לזהות סוגים מסוימים של סדירויות והוא המוביל אותנו לגלות חוקים בטבע המאפשרים לנו להתמצא בו. תמורות אלה הנעשות על ידי החושים והמוח מספיק דומות בין אדם לרעהו כדי שכולנו נראה את העצמים החיצוניים בדרך דומה. אולם יש הבדלים אישיים במידה מספקת כדי לאפשר לכל אחד לעצב לעצמו מבט אישי. כמו כן, כשם שהאמן בוחר בתצפיותיו, ברשמיו, בזיכרונו, את מה שהוא חושב כמועיל ליצירה שהוא מפיק, כך גם המדען, כדי לבנות את התיאוריה שלו, צריך לברור תת-קבוצה אחת מתוך כלל תצפיותיו ומבין התופעות המשויכות אליה, לבחור את אלה הנראות לו קשורות לעניין. אפשר אפוא לומר כי לכל עצם נתון יש ריבוי של תיאורים אפשריים ולכל תיאור נתון יש שפע של הצגות אפשריות.

ברור אפוא כי תיאור האטום שניתן על ידי פיזיקאי אינו שיקוף מדויק וקבוע של מציאות שנחשפה. זהו דגם, הפשטה, תוצאה של מאות שנות מאמצים של פיזיקאים שהתמקדו בקבוצה

קטנה של תופעות בניסיון לבנות תמונה עקבית של העולם. תיאור האטום נדמה שהוא יצירה כשם שהוא תגלית.

כמו בספרות ובציור, יש סגנון גם במדע; לא רק דרך להסתכל בעולם אלא גם לשאול אותו שאלות. זהו אופן שבו פועלים ביחס לטבע ומדברים עליו; דרך לתכנן ניסויים, לעשותם, להסיק מהם מסקנות, לנסח תיאוריות; לשוות להן צורה כדי להפיק מהן סיפור, לספר אותו או לכותבו.

ניקח לדוגמא את פסטר. היה משהו יוצא דופן בסגנונו, משהו כובש, שאין לעמוד בפניו. משהו המזכיר הסתערות חיל פרשים שהובילו לדלג מתחום אחד לאחר; לעבור מכימיה לקריסטלוגרפיה, אחר כך לחקר עולם החי בהיבטו הפחות ידוע. הוא זינק ללא היסוס ממחלות השמרים לאלה של האדם. בטוח באסטרטגיה שלו; ביכולתו להסיק מתיאוריה אל היישומים או, להפך, להפיק מהבעיה המעשית ביותר את ההיבטים היותר תיאורטיים. עם אינטואיציות מדהימות; הכללות בעלות תעוזה מטורפת.

אסימטריה מולקולרית; תסיסה; רבייה הנקראת ספונטנית; מחקרים על היין; מחלת תולעי המשי; מחקר על הבירה; מחלות נגיפיות; חיסונים נגד נגיפיים; מניעת הכלבת. עבודתו של פסטר נקראת כסדרת דוחות של ניצחונות. היה בו צד צבאי באיש הזה, משהו מן האסטרטג. הוא מזכיר את נפוליאון בדרכו לנקוט יוזמה תמיד, להחליף לפתע מגרש, להופיע במקום שלא ציפו לו, לרכז פתאום את כוחותיו בתחום צר עד לפריצת הדרך, לנצל את ההצלחה, למצות ממנה את המסקנות ואפילו לדאוג לפרסומו או לאלץ את האחרים לקבל את נקודת ראותו. אמנותו של פסטר, כמו זו של נפוליאון, היתה תמיד לצאת לקרב ברגע שבחר, במקום שבחר, בשטח שלו. והשטח שלו היה המעבדה; כלי נשקו: הניסויים, הדוחות, צלוחיות התרבית. בכל תחום שאליו נכנס, בין אם התעניין בגפנים או בתולעי המשי, בחולירע של תרנגולות או בכלבת, פסטר ניסה בכל פעם להציג מחדש את הבעיה, לתרגם אותה למונחים אחרים, לעשותה נגישה לניסויים. גם כיום אין נוהגים בדרך שונה. כל פעילותם של הביולוגים חותרת לנסח מחדש את הבעיות המגוונות ביותר כשאלות נגישות במעבדה. כל מאמציהם מכוונים להציג שאלות שעליהן אפשר לענות על ידי ניסויים. כי פסטר והאסטרטגיה שלו, הם תחילתה של הרפואה המודרנית ומה שנקרא כיום "רפואה ציבורית".

גם בלי פסטר מישהו אחר ודאי היה מגלה את תפקיד החיידקים במחלות המידבקות. מישהו היה מוכיח את קיומם של גורמים מסתננים, מה שנקרא מאוחר יותר נגיפים. היו מגלים את אפשרות החיסון. אלא שזה היה קורה קרוב לוודאי בתנאים שונים מאוד. בדרך מקוטעת יותר, לאורך זמן רב יותר, ועם מעורבות של חוקרים רבים בארצות רבות. אילו נעשה מחקר זה לא על ידי אדם יחיד וצוותו, ברצף מתמשך יחיד של עבודת מחקר, אפשר כמעט לומר בתנופה אחת, אלא פה ושם, על ידי מעבדות רבות, בצעדים קטנים, תוך הידוס איטי; אילו היו הפתרונות באים בגלים קטנים ולא בתנופה אחת, עדיין היה נשמר להם מקומם הבסיסי בתולדות הביולוגיה והרפואה, אולם הם היו מופיעים כעבודה חשובה אחת בין אחרות, עבודה שאינה חורגת מן הדרך המקובלת של המחקר; עבודה רבת-רושם אמנם, אך ללא הגדולה של עלילת פסטר.

כך גם ללא איינשטיין, ודאי היה בכל זאת מופיע משהו בדמות תורת היחסות; ללא דרווין, משהו הקרוב לתורת האבולוציה. אבל לא היו אלה אותן תיאוריות. הן לא היו כתובות באותה דרך, מוצגות באותה עוצמה, באותו כוח שכנוע. לא היו להן אותה השפעה, אותן תוצאות. גם במדע, כל יצירה היא מיוחדת במינה, ולא רק מבחינת תוכנה. אבל כמו באמנות – כדי לחזור אל אמרתו של ג׳ורג׳ אורוול – בין כל היצירות המיוחדות, יש ייחודיות יותר.

קרוב לוודאי כי הייצוג הרוחני של העולם החיצוני התעשר במהלך השלבים של התפתחות המוח שהובילו אל ההומו סאפיינס (האדם החושב). משהושגה תמונה משולבת של העולם במרחב ובזמן, עולם שבו ניתן לראות, לשמוע, לחוש ולגעת בעצמים בתנועה, משנתאשרה קביעותם של העצמים בזמן, נעשה אפשרי לשמור תמונה זו בזיכרון. כל התכונות האלה היוו בסיס לשתיים מסגולותיו החשובות ביותר של המוח. מצד אחד, המוח מסוגל לפרק למרכיביהן היסודיים את תמונות האירועים מן העבר השמורות בזיכרונו; מרכיבים אלה יכולים אז להתחבר בדרכים חדשות וליצור תמונות שלא נודעו עדיין, מצבים ותסריטים חדשים; הודות ליכולת זו אנו מסוגלים לא רק לשמור על תמונות של אירועים מן העבר, אלא גם לדמיין אירועים אפשריים, ובכך להמציא את העתיד. מהצד האחר, בשל קישור התפיסה השמיעתית של רצפים בזמן לשינויים מסוימים במנגנון התחושתי-תנועתי של תיבת הקול, רכשנו יכולת לסמל ולקודד ייצוגים קוגניטיביים בדרכים חדשות לחלוטין. לפי השערה זו, התיפקוד הראשוני של הלשון היה לאפשר ייצוג מפורט יותר של מציאות חדה, בהירה ועשירה יותר. כפי שחושבים בלשנים רבים, השימוש בלשון כמערכת תקשורת בין פרטים הופיע לאחר מכן, כתפקוד משני בלבד.

הקלוּת שבה יכולה להתרקם תקשורת בין פרטים מתגלה בכל עולם החי. די היה בצפנים פשוטים להעברת מידע שהיה צורך להתחלק בו כדי לענות צורכי הקיום הבסיסיים של החיים, אפילו אצל הוֹמינידים (אלה קרוביהם של הקופים הגדולים שקדמו לאדם המודרני במיליון שנים בערך) שחיו בקבוצות והתחברו כדי לצוד ולהתגונן. לעומת זאת, היכולת לזהות עצמים ואירועים חודשים או שנים מאוחר יותר דרשה מערכת הצפנה הרבה יותר משוכללת, מערכת שתאפשר לתרגם את ייצוג העולם החזותי והשמיעתי במידה מספקת של דיוק ופירוט. בעצם, אופייה הייחודי של הלשון נובע לאו דווקא מהיותה אמצעי להעברת הוראות לפעולה, אלא מכך שהיא מאפשרת סימול והעלאת תמונות מן ההכרה. האדם מעצב את "מציאותו" במלים ובמשפטים שהוא משתמש בהם, לא פחות מאשר בראייתו ובשמיעתו. הגמישות של לשון האדם מהווה מכשיר שאין דומה לו להתפתחות הדמיון. הודות לאינסוף הצירופים האפשריים של סמלים, היא מאפשרת לשכל להמציא עולמות שונים. כל אחד מאתנו חי כך בתוך עולם "אמיתי" המעוצב על ידי שכלו עם המידע שתורמים החושים והלשון. ועולם אמיתי זה, הוא התפאורה שעל רקעה מתרחש קיומנו היומיומי. זו הבמה של חיינו.

באמנות כמו במדע, העיקר הוא לנסות. מצד אחד, לנסות ניגודי צבעים, או נושאים הרמוניים או צירופי מלים; אחר כך לדחות את מה שאיננו אוהבים. מצד שני, לנסות דברים; לנסות רעיונות; כל אחד מהרעיונות העולים בראשנו; כל אפשרות בְּתורה, באופן שיטתי; אחר כך לזרוק את מה שאינו עומד במבחן הניסוי ולקבל את מה שעומד בו, אפילו אם הוא מנוגד לטעמנו או להנחותינו. רוב הזמן, ניסיונות כאלה אינם מובילים לשום מקום. אבל לעתים קורה שהניסוי המטורף ביותר פותח דרך חדשה. לדוגמא, הרעיון המוזר הזה שעלה יום אחד בראשו של ידידי אלי וולמן כאשר ניסינו לנתח את הזדווגות החיידקים: להפריד בלי התחשבות את הזוגות המאושרים הללו ולשים אותם במערבל מטבח, מעין משגל נסוג של חיידקים. היתה לזה תוצאה בלתי-צפויה: זה אִפשר לנו להראות כי בעת התהליך הכרומוזום של ה"זכר" עבר אל ה"נקבה" במהירות קבועה, כמו ספגטי שנבלע על ידי הנקבה. ומכאן דרך חדשה לבחון ולנתח את הזדווגות החיידקים. התחלה של מחקר היא תמיד קפיצה אל הלא-נודע. רק לאחר מעשה אפשר להכריע איזה ערך יש להשערה ההתחלתית. רעיונות מוטעים ותיאוריות תמוהות יש לאינספור במדע. מספרם עצום כמספר יצירות האמנות הגרועות. איש אינו יכול לומר לאן יוביל מחקר.

"מה שהיום מוכח לא היה בעבר אלא פרי הדמיון", כתב ויליאם בלייק ב**נישואין של הרקיע והשאול** (Blake, William – **The Complete Poems**, 2nd ed., London: Longman, 1989, p. 109). בשלב המדמיין של התהליך המדעי, כאשר מגבשים את ההשערות, המדען מתפקד כמו האמן. רק אחר כך, כאשר מופעלים המבחנים והניסויים הביקורתיים, נפרד המדע מן האמנות והולך בדרך משלו. שיר או ציור אינם כמו השערה מדעית. אך בכל המקרים, הדמיון הוא הכוח המניע, היסוד היוצר, במדע כמו באמנות או בכל פעילות שכלית אחרת. לא היתה זו רק סתם הצטברות עובדות אשר הובילה את ניוטון, יום אחד בגן של אמו, לראות לפתע את הירח כאילו הוא כדור שנזרק רחוק מאוד ובמהירות כזו שהוא נופל בדיוק מאחורי האופק סביב כדור הארץ. או מה שהוביל את פְּלאנק להשוות את קרינת החום למטח של קוונטים; או את ויליאם הַרוֶי לראות בלב חשוף של דג את פעימותיה של משאבה מכנית. בכל אחד מהמקרים הללו הבחינו לפתע בקיומה של אנלוגיה שעד אז נעלמה מן העין.

כפי שהעיר ארתור קסטלר (Koestler, Arthur – **The Act of Creation**, London, 1964), נראה שדרך חשיבה זו שונה מכל וכול מדרכו של המלך שלמה כאשר הִשווה את שדי השולמית האהובה שלו לשני עופרים תאומי צבייה, או מזו של ויליאם שקספיר המתאר את החיים כ"סיפור המסופר מפי אוויל, כולו המולה וזעם". ובכל זאת, למרות אמצעי הביטוי השונים מאוד של המשורר ושל המדען, הדמיון פועל באותה צורה. לעתים תכופות הרעיון הנולד מדימוי חדש הוא המדריך את המדען. עצם, מאורע, נתפסים לפתע באור לא צפוי ופוקח עיניים. כאילו הוסר לפתע מסך אשר כיסה עד אז על העיניים. הברקה פתאומית זו מלווה לעתים בקריאת "אאורקה" מצלצלת, המבטאת בה בעת הארה איטלקטואלית והלם הרגשי. לעולם לא אשכח את התפרצות הצחוק של ז'אק מונו יום אחד ב-1963, צחוק אדיר שיכולת לשמעו בכל הקומה שלנו במכון פסטר. במשך כמה חודשים הוא התרכז בתכונות החלבונים הקרויים אַלוֹסטֶריים. באותו יום אחר-הצהרים עלה בדעתו לפתע כי אפשר להסביר את רוב תכונותיהם אם מניחים שחלבונים אלה הם אוליגוֹמֶריים ייחודיים, כלומר נוצרו ממספר זוגי של תת-יחידות המסודרות באופן סימטרי. הוא שיחק בשתי קוביות גדולות, והראה לכל מי שעבר לידו את היתרונות של מבנים כאלה היכולים להתנודד בקלות בין שני מצבים, האחד בעל פעילות אנזימטית והשני בלעדיה. וכאשר נשאל באיזו דרך הגיע לכך, ענה: "מזה כמה שבועות אני מנסה להזדהות עם חלבון אלוסטרי. והיום לפתע הבנתי, חשתי בכל גופי את הפוטנציאל האדיר של מבנה סימטרי כזה."

הדמיון הוא הצירוף והתפעול בתוך ראשנו של דברים שכליים כמו דימויים, סמלים, מלים, מבנים קוגניטיביים וכו'. במגוון רחב מאוד של תחומים, מעשה היצירה לעתים תכופות כמוהו כקפיצה פתאומית של המחשבה אל מחוץ לדרכים המוכרות, וחיבור שני עצמים שעד אז לא היתה כל סיבה לקשר ביניהם. מחשבה הגיונית ומודעות אינן בהכרח הכלי הטוב ביותר לערבוב כזה של דימויים או ייצוגים מנטליים. כאשר השכל מתמקד בבעיה אחת לאורך זמן רב, רגיעה או ההרפיה הן לעתים הכלי המוצלח ביותר לניעור ולערבוב של דימויים ורעיונות, לחיבור בין מבנים אשר לכאורה אינם מתיישבים ביניהם ולהבחנה באנלוגיות שלא שוערו. מדענים רבים סיפרו כי מצאו לפתע, בנסיבות מאוד בלתי-צפויות, פתרון שחיפשו מזה זמן: במיטה, חצי ישנים; באוטובוס; כשהביטו בלהבות אש מרקדות; במשחקם עם ילד. לי עצמי היה ניסיון מסוג זה. יום אחד אחר-הצהרים, בקולנוע, עם אשתי, בעת שצפיתי במעומעם בסרט די משעמם, הבנתי לפתע כי שני סוגי המחקרים שהתנהלו במעבדה שלנו של מכון פסטר – המחקר על הליזוגֶניות עם אנדרה לבוף והמחקר עם ז'אק מונו על הביוסינתזה המושרית של אנזים – הם למעשה שני היבטים של אותה

תופעה, שני ביטויים של אותו מנגנון. ובגלל תכונות מסוימות של מערכת הפאז', הוויסות חייב להתבצע בשני המקרים ישירות על הדנ"א עצמו. הכרה זו באה לי כהלם, כוודאות מוחלטת; ודאות אשר עמיתי לא היו שותפים לה תחילה. אצלי שיקף הדבר כמובן דיבוק, שבמשך שבועות הייתי ממוקד באותה שאלה, מסתובב סביבה במעגלים, כולי ספוג בבעיה זו. עד לרגע שבו, המקרה או החלום בהקיץ חיברו בין שני התחומים, שעד אז היו נפרדים לחלוטין בעיני כולם.

אט אט, צעד אחר צעד, בונה הילד הקטן את סביבתו. כך בונה המדען בהדרגה את מציאותו. המדע אינו מעתיק את הטבע, לא יותר משעושה זאת האמנות. הוא יוצר אותו מחדש. כשהם מפרקים את מה שהם קולטים מן המציאות כדי לחברם מחדש אחרת, הצייר, המשורר או המדען בונים את תמונת היקום שלהם. כל אחד מעצב את דגם המציאות שלו, כשהוא בוחר להאיר את ההיבטים של ניסיונו, שאותם הוא מעריך כמשמעותיים ביותר, ולזנוח את אלה הנראים לו חסרי עניין. אנו חיים בעולם שנוצר על ידי המוח שלנו, בתנועה מתמדת בין המציאותי למדומיין. האמן אולי לוקח מעט יותר מן האחד והמדען מעט יותר מהאחר. זה רק עניין של מידה. לא של מהות.

חתימה

"המדע, האם הוא הבטיח את האושר?
הוא הבטיח את האמת, והשאלה היא
האם האמת תביא אי-פעם את האושר."

אמיל זולא, נאום לסטודנטים
של פאריס, 18 במאי 1893

בוויכוח בין קונפוציוס לבין אחד מתלמידיו שאל הלה את מורו מה הוא חושב לחיוני כדי למשול היטב. "מה שצריך תחילה", עונה המורה, "הוא להשליט סדר במלים ובשמות". – "מוזר!" אומר התלמיד, אבל זו אינה השאלה. – "כמה נבער אתה! בר-דעת נעלה שאינו יודע, שותק. אם השמות והמלים אינם נכונים, הלשון אינה תואמת את אמת הדברים. אם הלשון אינה תואמת את אמת הדברים, אי אפשר לטפל בעניינים כהלכה. אם העניינים אינם מטופלים כהלכה, המנהגים הטובים והמוזיקה אינם פורחים. כאשר המנהגים הטובים והמוזיקה אינם פורחים, העונשים אינם מוטלים כיאות. כאשר העונשים אינם מוטלים כיאות, האנשים אינם יודעים להניע לא רגל ולא יד. לכן, בר-דעת נעלה רואה כחיוני להשתמש נכון במלים שהוא נוקט כדי לומר ולבטא בצורה הולמת את מה שיש לו לומר. מה שדורש בר-דעת נעלה הוא שלא יהיה אף דבר לא נכון בדיבורו."
(“Analects of Confucius”, Book XIII, in **The Bible of the World**, R.A. Ballou, ed., New York, The Viking Press, 1939, p. 411).

מלים מסוימות מפחידות. למשל המלה "אאוגניקה", משום שהיא מציינת התנהגות בלתי-קבילה שהובילה אל העיקור של אנשים שנחשבו "נחותים", עוד לפני שנעשה בה שימוש כדי לתרץ את הזוועות של מחנות הנאצים. ממלים אחרות, כמו המלה "גזע", נגזלה משמעותן והן שימשו אליבי ביולוגי להפקרות תרבותית. אפילו המלה "גנטיקה" כבר מפחידה רבים, משום שמרבים להשתמש בה ללא הבחנה כדי להשפיע על מדיניות חברתית. כאשר קובעים כי התבונה

ביסודו של דבר עוברת בתורשה, כלומר, נשלטת בעיקר על ידי גנים, הרי זה כדי לומר כי מדיניות חברתית שמטרתה לחנך אוכלוסיות מקופחות היא חסרת תועלת. כאשר מצהירים כי לנערים יש "גן למתמטיקה", הכוונה היא לומר כי לנערות אין גן כזה. בבוסניה וברואנדה למדנו כי השמדת עם, שנראה כאילו נעשתה בלתי אפשרית לאחר נפילת הנאצים, עלולה בהחלט להתרחש שוב. אנו יודעים גם כי טיעונים, המוכיחים את קיומם של הבדלי גישות בלתי ניתנים לגישור בין קבוצות, משמשים תכופות כדי לתמוך באפליה ולבלום מדיניות שמטרתה לתקן אי-צדק. קיומו של מרכיב גנטי בהתנהגותו של אדם אין פירושה כלל כי זו נקבעת אך ורק על ידי הגנים. אנו יודעים היום כי התפתחות העובר האנושי כרוכה בפעילות גומלין מתמדת בין הגנים ובין הסביבה.

אנשים שואלים לפעמים האם יכולים להיות גבולות למחקר המדעי. שאלה זו היא חדשה יחסית. המאה ה-18 מעולם לא צפתה את עצם האפשרות של גבולות כאלה. ההשקפה השלטת היתה דווקא כי המדע יפתור במוקדם או במאוחר את כל השאלות הניצבות בפני האדם. אך ברור כשמש כי בעיות מסוימות אינן כלל עניין למדע. יש גבול למחקר המדעי. הוא מסרב להתייחס אל שאלות מן הסוג: מהו טעם החיים? כיצד החל הכול? מהי התכלית שלנו על פני כדור הארץ? למדע אין מה לומר נוכח שאלות כאלה. איננו יכולים אפילו לדמיין מה תהיה ההתקדמות המדעית שתאפשר לענות עליהן. שדה אחד נמצא כולו מחוץ לתחום של כל מחקר מדעי, זה השדה העוסק במקורו של העולם, במשמעות מצבו של האדם, ב"ייעוד" של חיי האנוש. לא ששאלות אלה חסרות ערך. כל אחד מאתנו שואל אותן במוקדם או במאוחר. אולם שאלות אלה, שקרל פּוֹפֶּר (Popper, Karl – **The Logic of Scientific Discovery**, London, Routledge, 1977) קורא להן שאלות סופיות, נמצאות בתחומי הדת, המטפיזיקה, שלא לומר השירה. שום מדע אינו מסוגל לספק תשובות לשאלות כאלה.

אם איננו חורגים מן הבעיות שבתחום המדע, נוכל לשאול מה עשוי להיות טבעם של הגורמים המגבילים את המדע. שאלה זו נידונה על ידי פטר מֶדָבָר (Medawar, Peter – **The Limits of Science**, Oxford University Press, 1985), המבחין בשני סוגים אפשריים של מגבלות. ראשית לכול, אפשר לשאול האם גידול הידע המדעי עלול להיעצר על ידי תכונה שהיא מעצם טבעו של המחקר המדעי. לדוגמא, תהליך המחקר עצמו עשוי להאט בהדרגה באופן ספונטני עד שייעצר כליל. כך עשוי להיות גבול להתפתחות המדע, כפי שיש גבול לגובהו של בניין שאינו יכול לגדול עד אין סוף לעבר השמיים; או לגודלה של חיה, כגון פיל, שאינו יכול לגדול עד אין סוף בכל הכיוונים. אפשר לשאול אם המדע מסוגל לחרוג מעבר למסה מסוימת של ידע. אבל מראש לא נראות הסיבות העלולות להגביל כך את הידע ולאלץ את המחקר לעצור מעצמו.

אפשרות אחרת: שיש גבול לידע המדעי, בגלל מגבלותיו של האדם. כאשר ניגשים אל תחום חדש, לומדים בו תחילה את הקל ביותר. אל המורכב, הקשה, ניגשים רק אחר כך. בשלב שני זה יש צורך ביתר עידון, במכשירים טובים יותר, בניתוח חד יותר. שתי השוואות יכולות לעזור לנו כדי לדבר על מנגנון התפיסה שלנו. כאשר יוצאים לדוג עם רשת, גודל הדג שניתן לתפוס תלוי בגודלם של חורי הרשת. רשת התפיסה שלנו אפשר שיהיו בה חורים גדולים מכדי לתפוס דגים שגודלם קטן מגודל מסוים. הוא הדין ביכולת ההבחנה של מיקרוסקופ, יכולת שאינה תלויה בכושר ההגדלה שלו כפי שזה בזכוכית מגדלת. מה שמאפשר למיקרוסקופ להבחין בפרטים הוא כושר ההפרדה שלו. באמצע המאה ה-19 שוכלל המיקרוסקופ האופטי עד לנקודה שבה הצביע על קיומם של מבנים שונים בתא, אך לא היה מסוגל לחשוף את פרטיהם. ובפרט הוא לא אִפשר לראות נגיפים, דבר אשר רק המיקרוסקופ האלקטרוני מצליח לאפשר לנו להבחין בו. וכך, ניתן לשאול את עצמנו האם אין גבול כלשהו לכושר ההפרדה של המוח או של מערכות החישה של האדם. כרגע

איננו יכולים כלל להעלות בדעתנו מה יוכל לסייג את כושר האנליזה שלנו. אך לעולם אין לדעת. אפשר שהמוח האנושי אינו מסוגל להבין את המוח האנושי.

לצד מגבלה אפשרית של מה שבני אדם **יכולים** ללמוד, נוכל לתהות לגבי מגבלות אפשריות של מה שהם **צריכים** ללמוד. במלים אחרות: האם יש מידע המוביל לידיעה אשר עדיף לבני אדם שלא להשיגה? האם יש למחקר המדעי גבול הנכפה עליו לא על ידי האפשרות לדעת אלא על ידי כדאיות העניין לדעת? האם עלינו לעצור מללמוד דברים מסוימים מפחד מפני שימוש העלול להיעשות בידע זה? זו נקודה חשובה. שכן, אף שלעתים קרובות נטען שיש צורך להימנע מיישומים מסוימים של המדע, איש לא טען עדיין כי עלינו להימנע מן הידע עצמו. כאשר בסוף המאה ה-19 חיסן פסטר כבשים נגד חיידקי הגחלת (אנתרקס), צעקו האיכרים וראשי הכפרים השכנים כי יש לאסור את המטורף הזה לפני שישמיד את כל המקנה של האזור. למרבה המזל, לא הקשיבו להם. כאשר בסוף שנות השבעים של המאה העשרים רצו אקולוגים לאסור על המשך המחקרים בהנדסה הגנטית, הם לא זכו לתמיכה, וכל הרפואה מסתמכת כיום על המחקרים שנעשו מאז. אבל בכל המקרים הללו, הידע היה קיים. הוויכוח התנהל רק על יישומיו. האם צריך או לא צריך להשתמש בצמחים שהוכנסו בהם שינויים בהנדסה הגנטית תוך סיכון לחולל שינויים בשדות שלמים? האם יש או אין להשתמש בחיידקים לייצור חלבונים מועילים, כגון גורמי גדילה או הורמונים, תוך סיכון ליצור מפלצות?

לצד שאלות אלה, ניתן לשאול האם בכלל עלינו להמשיך לרכוש היבטים מסוימים של הידע עצמו. למשל, בגנטיקה של האדם, אפשר לחשוב כי פענוח הגנום האנושי עשוי להביא למצבים העלולים להיות מסוכנים. דוגמא לכך עשוי להיות גילוי היפותטי של קשר בין רגישות לגז רעיל לבין גובה האדם; אם האנשים הנמוכים ירצו להיפטר מהגבוהים בעיר, כל שעליהם לעשות הוא לרסס מעל העיר ענן של גז שלא יפגע בהם. ועוד דוגמה: קשר בין פיגור שכלי ובין צורת האוזניים עשוי לעורר מעין גזענות כלפי אוזניים. קישורים כאלה הם דמיוניים. אך קל לראות איך קישורים דומים עלולים מטבעם לגרור לפשעים או לסטיות חברתיות.

גם במקרים אלה, הסכנה, אם היא קיימת, טמונה בסופו של דבר ביישום הידע החדש ולא בידע עצמו. אי אפשר לעצור את החיפוש אחר הידע. אין הוא יכול להיות מנותק מן המין האנושי. הניסיון להבין את הטבע הוא חלק מטבע האדם. כפי שכבר אמרתי, איש אינו יכול לצפות לאיזה כיוון יפנה מחקר הנמצא בתחילתו, וגם לא למה הוא יביא. אי אפשר לעסוק במה שיהיה מדע "טוב" ולעצור את מה שייחשב כ"רע". כשם שאי אפשר לעצור את המחקר, כך אי אפשר להחזיק רק בחלק ממנו. על כל פנים, אין לחשוש מפני האמת, בין היא באה מן הגנטיקה או מכל מקור אחר. מה שיש לפחוד מפניו הוא עיוות הממצאים וסילוף המשמעות שמקנים להן.

למעלה משלוש מאות שנים חלפו מאז נולד המדע במערב, ומאז הוא מנסה את כוחו בכל הכיוונים. מאז הוא משמש אותנו כדי לבנות את מה שאנו מכנים התרבות המודרנית שלנו. מן המדע הזה באים כל היסודות של הטכנולוגיה בת זמננו, אלה שאותם אנו אוהבים: המטוסים, הטלוויזיה, הפניצילין, מניעת ההריון; כמו גם אלה שאנו שונאים: הפצצות הגרעיניות, חומרי ההדברה, המטרדים מכל הסוגים.

שלוש מאות שנים, זו לא תקופה ארוכה מאוד. אבל די בה כדי לנסות ולהעריך את התהליך, כדי להחליט האם דרך פעולה זו עשתה שירות לאנושות, אם לאו. קולות צורמים לא מעטים עלו סביב הנושא. מראשיתו התעוררו קולות כדי להתנגד לכך. קולות אשר מעת לעת, בראשית המהפכה התעשייתית, למשל, או עם בואה של האנרגיה האטומית, נשמעו בעוצמה וצעקו: די! מספיק! עִצרו הכול! שובו לאחור! מְצאו שיטה אחרת, פחות מסוכנת למין האנושי!

מובן כי המדענים מחזיקים בדעה אחרת. בעבורם המפעל המדעי מייצג את ההישג הגדול ביותר של האנושות. הוא אשר, יחד עם האמנויות, אִפשר באמת להרפתקה האנושית להתפתח במלוא עוצמתה. אך מה שהושג עד כה אינו אלא ההתחלה. לאמיתו של דבר, המדע לא נולד באמת לפני שלוש מאות שנים. התפתחותו השיטתית החלה רק לפני כמאה שנים. רק לפני חמישים שנה הוא מצא את הקצב שלו, מעת שנעשה מעין מוסד והתפשט בעולם כולו, ללא מחסומים של גבולות, של אומות, של לשונות או של דתות. אך בה בעת, ככל שהמדע מתקדם, כן אנו נוכחים כי הרבה יותר נמצא עוד לפנינו. הביולוגיה, למשל, רק זה עתה יצאה לדרך. היא רק מתחילה להתקיים, ובעקבותיה הולכת ונולדת רפואה חדשה. מה שמצוי באופק – אם המאמץ של המחקר הבסיסי יימשך – הוא לא רק ההשתלטות על מחלות רבות או שיפור החקלאות. עם הבנה טובה יותר של התהליכים הבסיסיים של עולם החי, אנו יכולים לקוות ללמוד יותר על עצמנו. אנו מבקשים נואשות לדעת מי אנו, מאין באנו ומה אנו עושים כאן. ודאי, כפי שאמרתי, המדע לא יענה על כל השאלות. הוא יכול, עם זאת, לספק רמזים, לשלול פתרונות מסוימים. אולי המשך המאמץ המדעי יעזור לנו לעשות פחות שטויות. זהו מעין הימור. אך אין לנו הרבה אפשרויות אחרות. יתר על כן, אנו כיום חמישה מיליארד אנשים. מחר נהיה עשרה מיליארד. מחרתיים, עשרים. סיבוכים נוראים רובצים לפתחה של האנושות. גם בגלל זה, המשך המחקר המדעי נראה חיוני כדי להתוות פתרונות.

התגלית העיקרית שהביאה לנו המאה העשרים, מאת השנים של מחקר ומדע, היא קרוב לוודאי העומק של אי-ידיעתנו את הטבע. ככל שאנו לומדים יותר, כן אנו תופסים יותר את שיעור אי-הידיעה הזו. אלה הן חדשות כבירות כשלעצמן. חדשות שהיו בוודאי מפתיעות את אבותינו בני המאות ה-18 וה-19. בפעם הראשונה אנו יכולים להיישיר מבט אל פניה של אי-הידיעה שלנו. במשך זמן רב התיימרנו להבין כיצד פועלים הדברים. פשוט סיפרנו סיפורים כדי לסתום את החורים. עתה, משהתחלנו לחקור ברצינות את הטבע, אנו מתחילים לתפוס את היקף השאלות. למוֹד את המרחק שיש לעבור כדי לנסות לענות עליהן. הסכנה הגדולה לאנושות אינה התפתחות הידע. זו הבורות.

התחלתי ספר זה בניסיון להסביר מדוע מצבנו קשור ללא עוררין אל הבלתי-צפוי, אל אי-האפשרות לענות על השאלה המעניינת אותנו ביותר בעולם: מה יקרה מחר? אי-הידיעה ממה עשוי המחר משפיעה על כל אחד מאתנו באופן שונה. יש מי שרוצים לדעת אם ימצאו עבודה, אם יזכו במרוצי סוסים, אם אהובן יאהב אותן עדיין, או אהובתם תאהב אותם עדיין, אם יהיו עוד בחיים. באשר לי, מה שחשוב לי ביותר, הוא שאינני יודע מה יהיה העולם בעוד חמש מאות שנים. או אפילו מאה שנים. או אפילו עשרים שנה!

אנו תערובת מעוררת יראה של חומצות גרעיניות ושל זיכרונות, של תשוקות ושל חלבונים. המאה שהסתיימה עסקה הרבה בחומצות גרעין ובחלבונים. המאה הבאה תתרכז בזיכרונות ובתשוקות. האם תדע לפתור שאלות כאלה?