

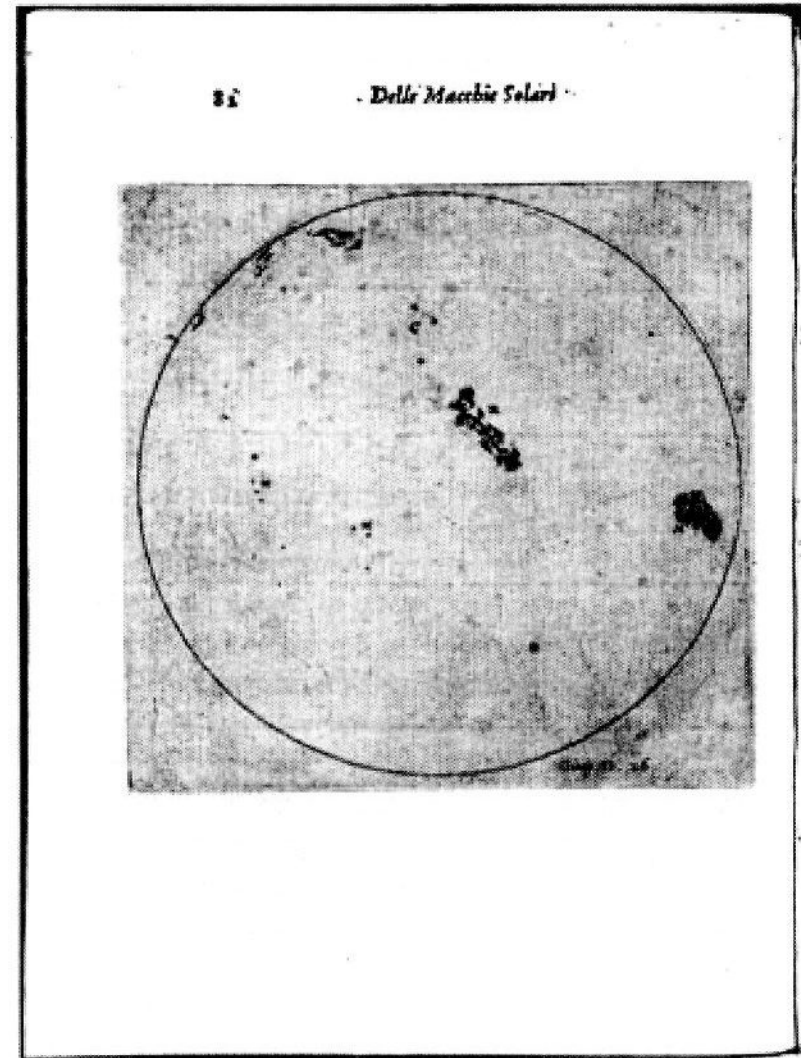
מה היה ידוע?

היקפו של הידע וטבעו של הטבע

בזמן כלשהו בין סוף שנת 1610 לאמצע 1611, כיוון המתמטיקאי ופילוסוף הטבע האיטלקי גלילאו גליליי (Galilei, 1642-1564) מכשיר חדיש בשם טלסקופ אל השמש. הוא גילה שם כתמים כהים, ככל הנראה על פני החמה עצמה. גלילאו דיווח שצורתם של הכתמים בלתי מוגדרת ושמשפרם וכהותם משתנים מיום ליום (תרשים 1). נוסף על כך, הם לא נותרו במקומם, אלא נראו נעים בסדירות על פני השמש ממערב למזרח. הוא לא התיימר לדעת בוודאות כלשהי ממה עשויים הכתמים. ייתכן שהכתמים הם תופעות פיזיות על פני השמש, או משהו דומה לעננים שעל כדור הארץ; ייתכן גם שהם "אדים העולים מהארץ ונמשכים אל השמש". אך בעוד שמשקיפים אחרים בני הזמן היו סבורים שהכתמים הם כוכבי לכת קטנים הסובבים את השמש במרחק לא מבוטל ממנה, גלילאו הסתמך על חישובים באופטיקה מתמטית בטענו שהכתמים "אינם מרוחקים כלל מפני השטח, אלא נמצאים עליהם ממש או מרוחקים מהם במרחק כה קטן עד שאין למדודו".

לא תצפיותיו של גלילאו בכתמי השמש, אלא הפירוש המסוים שהעניק לכתמים אלה הוא שנתפס כקריאת תיגר חמורה על כל המבנה של פילוסופיית הטבע, מבנה שייסד אריסטו (384-322 לפנה"ס) ושהפילוסופים הסכולסטיים של ימי הביניים והרנסנס ביצעו בו שינויים והתאמות.⁶ השקפותיו של גלילאו על כתמי השמש, יחד עם תצפיות וטענות תיאורטיות אחרות שלו, שיקפו פקפוק עמוק בהבחנה האריסטוטלית החשובה בין הפיזיקה של גרמי השמים לזו של הארץ. הסברה המקובלת מהעת העתיקה ועד לזמנו של גלילאו הייתה שטבעם הפיזי ועקרונות תנועתם של גופים שמימיים שונים מאלה התופסים על פני הארץ. הארץ וכל התחום שבינה לבין הירח היו כפופים לתהליכים המוכרים של שינוי ודעיכה. כאן, התנועות זוויתיות ובלתי רציפות. אך השמש, הכוכבים וכוכבי הלכת צייתו לעקרונות פיזיים שונים למדי. בתחומם לא ייתכנו שינוי או חוסר שלמות. גרמי השמים, אם זו כלל, נעו ברציפות ובמעגלים, וזאת מכיוון שהתנועה המעגלית הרצופה היא התנועה המושלמת ביותר שבאפשר. מסיבות אלה מיקמה החשיבה האורתודוקסית את כוכבי השביט בתוך האטמוספירה, או בכל אופן מתחת לחוג הירח: גופים חולפים אלו, שנעו באי-סדירות, ודאי לא היו מסוג הדברים היכול להשתייך לרקיע. אמנם, בסוף המאה ה-16 ובתחילת המאה ה-17 נשמעה פה ושם הדעה שגם בשמים ייתכנו שינויים, אך טענות מסוג זה עדיין נחשבו לקריאת תיגר על האורתודוקסיה.

במסגרת אורתודוקסית זו לא ניתן היה להעלות על הדעת כתמים או פגמים על השמש. גלילאו היה מודע היטב לסוג ההיגיון הא-פריורי היוצא מהאמונה המקובלת והמסורתית שהשמש הנה מושלמת ובלתי משתנה ומסיק ממנה שהכתמים אינם יכולים להיות על פני השמש. הוא טען נגד יריב אריסטוטלי, בפשטות, שאין זה לגיטימי להתייחס בוויכוח לשלמותה של השמש כאל נתון שעליו אין לערער. למעשה, עלינו להסיק מהעובדה שהכתמים נמצאים על פני השמש, עובדה שגלילאו ראה אותה כמבוססת היטב בזכות תצפיותיו, את המסקנה



1. תצפיות כתמי השמש של גלילאו מיום 26 ביוני 1612. מקור: Galileo Galilei, *Istoria e dimostrazioni intorno alle macchie solari ...* (Roma, 1613).

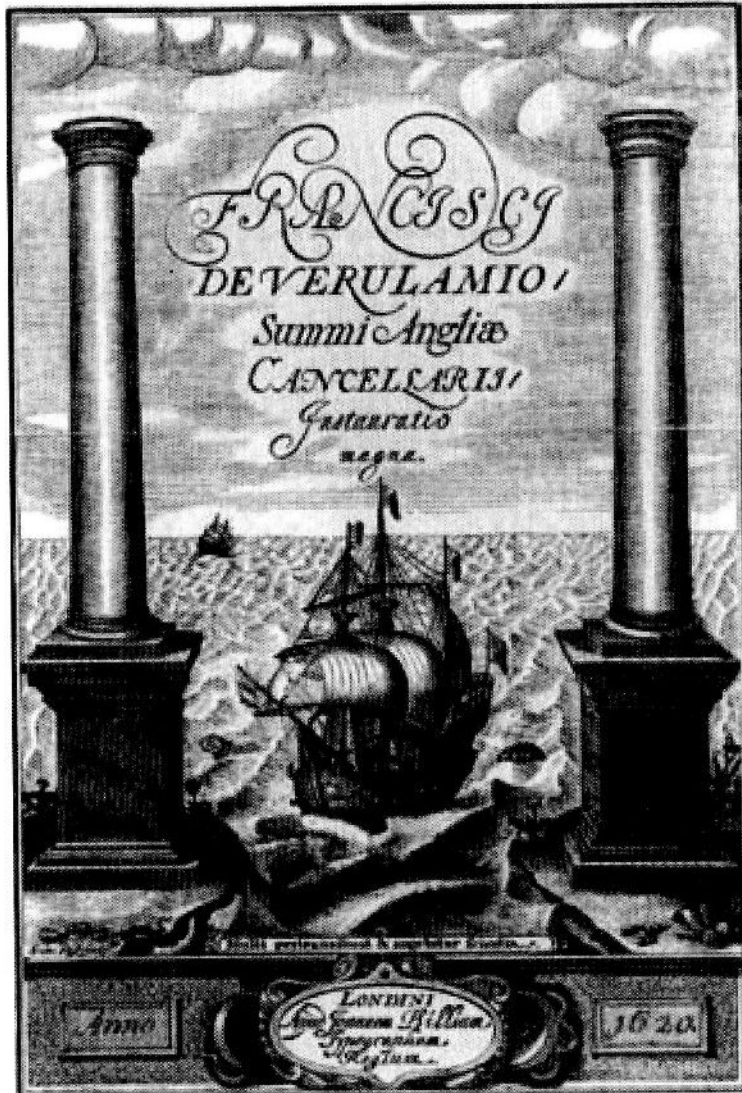
שתיתכן אי-שלמות גם בשמים ולא רק בארץ:

אין זה מוכיח דבר לומר [...] שאין להאמין בקיומם של כתמים כהים על השמש מכיוון שהשמש היא גוף צלול ביותר. כל עוד נהגו בני האדם לכנות את השמש "טהורה ביותר וצלולה ביותר", לא נמצאו בה כל צל או אי-טהרה; אך עתה היא מתגלה בפנינו כבלתי טהורה ומוכתמת, אז מדוע לא נכנה אותה "מוכתמת ולא טהורה"? הרי יש להתאים את השמות והתכונות למהותם של הדברים, ולא את המהות אל השמות, מכיוון שהדברים באים ראשונים, והשמות אחריהם.

תפיסה זו זוהתה כאופן חדש של חשיבה על עולם הטבע ועל הדרכים שבהן ניתן להגיע לידע אמין על אותו עולם. גלילאו התייצב כנגד האמונות המקובלות על המבנה היסודי של הטבע; הוא טען נגד קבלתה של הדוקטרינה האורתודוקסית בחשיבה על הטבע כמוכנת מאלוהים, ובעד הכפפתה לממצאים הנובעים מתצפיות מהימנות ומהיגיון ממושמע ומתמטי.⁷ בכל הנוגע לאפשרויות של הידע האנושי, עמדות כמו זו של גלילאו היו אופטימיות מיסודן. כמו רבים אחרים שקראו תיגר על האורתודוקסיה העתיקה בסוף המאה ה-16 ובתחילת המאה שאחריה, גלילאו טען שאין שני סוגים של ידע על אודות הטבע שכל אחד מהם מותאם לתחומו הפיזי המוגדר, אלא ישנה צורת ידע אוניברסלית אחת ויחידה. יתרה מזו, כאשר הצביע גלילאו על הדמיון בין גופים שמיימיים וארציים, הוא הניח שחקר תכונותיהם ותנועתם של גופים ארציים מסוגל להניב הבנה על טיבו של הטבע האוניברסלי. לא זו בלבד שניתן היה לגייס את פגמיהם והשתנותם של דברים על פני הארץ כמשאבים להבנתן של תופעות שמיימיות; פילוסופים מודרניים של הטבע גם טענו שתופעות ארציות מלאכותיות, מעשה ידי אדם, עשויות לשמש כדגם לפעולתן של תופעות טבעיות. תנועתו של פגז הנורה מלוע תותח עשויה לשמש כמודל לתנועתו של כוכב נגה.

האובייקטים הטבעיים החדשים שהובאו באותה תקופה ללא הרף לידעתם של תושבי אירופה ליבו את האופטימיות הזאת בנוגע לגבולותיו האפשריים של הידע האנושי. כאשר אמר המלט להורציו ש"בשחק ובארץ יש דברים [...] יותר מכל אשר תחלום בינת עִתִּיךָ",⁸ הוא תיאר תחושה דומה לזו של הפילוסופים של הטבע שקראו תיגר על האורתודוקסיה העתיקה בראשית העת החדשה. אלה פטרו את רשימות המצאי המסורתיות של הדברים הקיימים בעולם כדלות עד כדי חוסר לגיטימיות. באיזו זכות דרש הידע העתיק שיכבדו את הגבולות שהציב למלאי הידע העובדתי? מדי יום צצו תופעות חדשות שלא נזכרו בכתבים העתיקים. נוסעים שחזרו מהעולמות החדשים במזרח ובמערב הביאו עמם צמחים, בעלי חיים ומינרלים שבני אירופה לא ראו כדוגמתם – וסיפורים למכביר על עצמים נוספים. סר וולטר ראלי (Raleigh) מחה בפני ספקנים אוהבי בית ש"בעולם ניתן לראות דברים משונים יותר מאלה הנמצאים בין לונדון לסטיינו".⁹ החל מתחילת המאה ה-17, המביטים מבעד לטלסקופים ולמיקרוסקופים הכריזו על חשיפת גבולותיהם של החושים האנושיים הבלתי מזוינים, ורמזו שבעזרת מכשירים משופרים יהיה אפשר לגלות עוד ועוד פרטים ונפלאות. פרקטיקות אינטלקטואליות חדשות ומשופרות חקרו את צפונות עברם של המין האנושי והטבע, וטענו לידע מהימן על מאורעות ששום אדם חי לא היה עד להם. החפצים בערעור התיאוריות האורתודוקסיות אחזו כמוצאי שלל רב בישויות שהתגלו זה לא כבר והציבו קושיות בפני שיטות פילוסופיות קיימות. מי יוכל לומר מה קיים ומה לא קיים בעולם, כאשר מחר אולי נגלה בתחומי הקטן מאוד והרחוק מאוד בריות שעד כה שום אדם לא חלם על אודותן?

בשנת 1620 פרסם הפילוסוף האנגלי סר פרנסיס בייקון *Instauratio Magna* (Bacon, 1561-1626) טקסט בשם (התחייה הגדולה). הכותרת עצמה הבטיחה את שיקומה של הסמכות



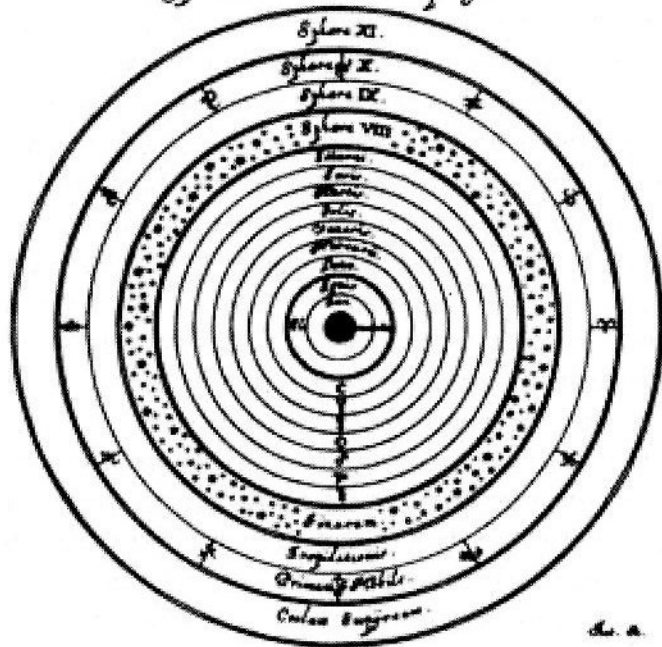
2. עמוד השער של ספרו של פרנסיס בייקון החייה הגדולה (Instauratio Magna, 1620).

העתיקה, בעוד שעמוד השער המגולף של הספר היווה ביטוי איקונוגרפי מלא חיים של האופטימיות החדשה לגבי אפשרויותיו ורוחב ידיעתו של הידע המדעי (תרשים 2). ספינה, המייצגת את החקר, נראית כשהיא מפליגה מעבר לעמודי הרקולס, הם מצרי גיברלטר, שייצגו באופן מסורתי את גבולות הידע האנושי. מתחת לאיור מופיע ציטוט נבואי מספר דניאל – "ישטטו רבים ותרכה הקצת". בייקון הסביר מאוחר יותר שהנבואה התנ"כית התגשמה כאשר "פתיחת העולם באמצעות השיט והמסחר וגילוי הידע החדש נפגשו במקום אחד ובעת אחת". הביטוי המסורתי לגבולות הידע, plus ultra – "לא עוד הלאה" – הוחלף בסיסמה המודרנית plus ultra – "עוד הלאה". תחייתו של הידע על הטבע באה בעקבות הגדלתו של עולם הטבע הניתן לידיעה. חוקרים שחפצו בכך יכלו לנצל את הישועות והתופעות שהתגלו זה עתה כדי לערער עד היסוד סכמות פילוסופיות קיימות.

קריאת התיגר על יקום שבמרכזו האדם

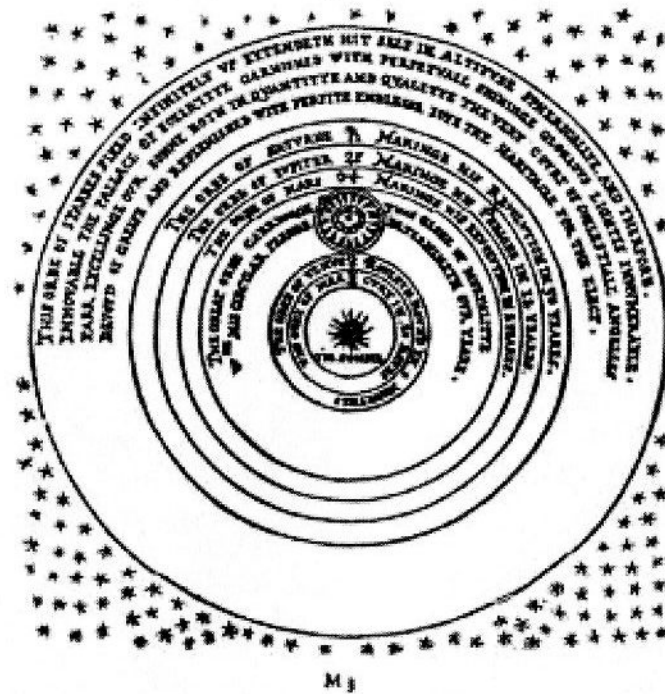
רבות מעבודות המחקר באסטרונומיה ובפיזיקה שערך גלילאו בתחילת המאה ה-17 נועדו לספק תימוכין למודל הפיזיקלי החדש של היקום, שאותו פרסם בשנת 1543 ההגמון הפולני ניקולאוס קופרניקוס (Copernicus, 1473-1543) (תרשים 3). עד אמצע המאה ה-16 לא היה ניתן למצוא במערב הלטיני מלומדים שיטילו ספק רציני ושיטתי בשיטתו של קלאודיוס תלמי (Ptolemy), סביבות 100-170), שיטה שמיקמה את הארץ במרכזו הקבוע של היקום ואת מסילות כוכבי הלכת, הירח והחמה על פני גלגלים בעלי ממשות פיזית המקיפים את הארץ (תרשים 4). מאחורי הגלגלים הללו ניצב הגלגל הנושא את הכוכבים הקבועים, ומאחוריו גלגל היוצר בסיבוביו את תנועתה המעגלית של המערכת כולה. שיטתו הגאוצנטרית של תלמי שואבת מתפיסות יווניות על

Hypothesis Ptolemaica Alphonsina.



4. הקוסמוס על פי תלמי, באיור מאמצע המאה ה-17 מאת האסטרונום הגרמני-פולני
 החשוב יוהנס הבליוס (1611-97). מקור: Johannes Hevelius, *Selenographia* (1647).

A perfit description of the Coelestiall Orbes,
 according to the most ancient doctrine of the
 Pythagoreans, &c.



3. איור של המערכת הקופרניקאית על פי רישום משנת 1570 מאת המתמטיקאי האנגלי
 תומס דיגס (לערך 1546-1595). דיגס שכלל את עמדתו של קופרניקוס כאשר פיתח
 תפיסה של יקום פיזיקלי אינסופי שבו הכוכבים נמצאים בנקודות שונות בחלל האינסופי.
 מקור: Thomas Digges, *A Perfit Description of the Caelestiall Orbes* (1576).

במרכז, ובמרחק הגדול ביותר מהגופים הבלתי נשחתים והטהורים יותר, הם השמים". יתר על כן, מאז החטא הקדמון וגירושם של אדם וחוה מגן העדן, הושחתו חושיו של האדם; המגבלות הנוקשות החלות על אפשרויות הידע האנושי היו מוסכמות על כולם. מצד אחד, אופן המחשבה המסורתית גרס שהעולם שבו חיים בני האדם את חייהם הקצרים – העולם שבמרכז היקום – הוא חריג בהשתנותו ובאי־שלמותו; מצד אחר, המגוון והאיכות של הידע שאותו יכלו בני אדם אלה להשיג היו מוגבלים.

הפילוסופים של הטבע שתמכו בעמדותיו של קופרניקוס ופיתחו אותן בסוף המאה ה־16 ובמאה שלאחריה תקפו את האנתרופוצנטריות הזאת במגוון דרכים. הארץ לא עמדה עוד במרכז היקום, אלא הונפה אל תוך השמים והפכה ללא יותר מאחד מכוכבי הלכת המקיפים את השמש. במובן מילולי זה, האנתרופוצנטריות נדחתה.¹⁰ הניסיון האנושי, ניסיון של חיים על משטח סטטי שאותו מקיפים מדי יום השמש והכוכבים נוסף על תנועותיהם השנתיות, נשלל. בניגוד להיגיון הפשוט האומר שהארץ יציבה, טענה האסטרונומיה החדשה שהיא נעה בשני אופנים שונים: מדי יום סביב צירה ומדי שנה סביב השמש, שהפכה עתה לסטטית.¹¹ הניסיון היומיומי זוהה כאן יותר מאשר "מראית עין". ההיגיון הפשוט אומר לנו אמנם שאילו כדור הארץ אכן היה נע כך, היינו נאלצים לתפוס בחוזקה בכובעינו או אפילו להיאחז בארץ כדי לא ליפול מעל פניה. אך אם הדברים אינם כך, נראה שהבעיה טמונה בהיגיון הפשוט. אם אבנים הנזרקות מעלה מעל פני הארץ נוטות ליפול מעל פניה אל אותה נקודה שממנה הושלכו, הרי שיש לפתח פיזיקה חדשה, אשר לא תהיה כפופה להיגיון הפשוט ושתראה כיצד ייתכן הדבר על כדור הארץ הנע. מקומו של כדור הארץ ביקום איבד את ייחודו. כמה קופרניקאים אף הסיקו מאובדן הייחוד הזה את אפשרות קיומם של חיים על עולמות אחרים ואת היתכנותם של בני אדם מסוגים אחרים. בשנת 1638 פרסם המתמטיקאי האנגלי ג'ון

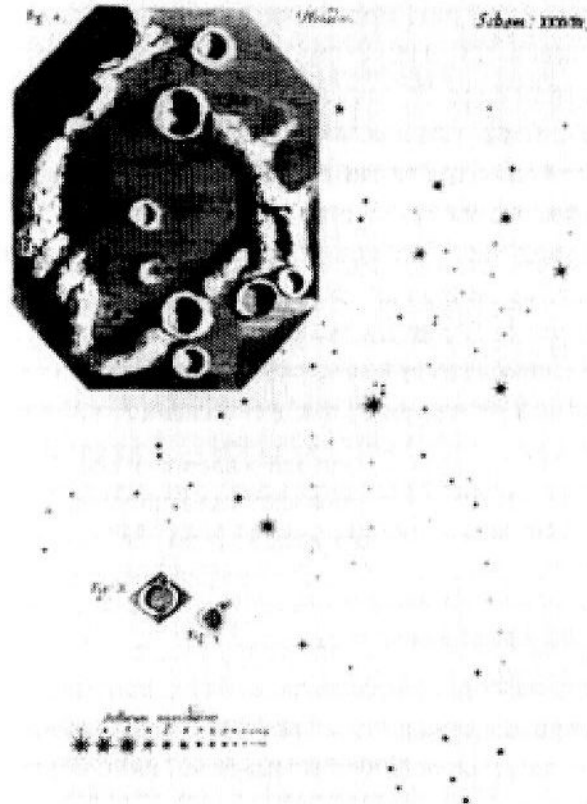
אודות טבע החומר. לכל אחד מארבעת ה"יסודות" – אדמה, מים, אוויר ואש – יש "מקום טבעי", וכאשר היסוד נמצא במקום זה הוא במנוחה. כמובן, הגופים שבהם אנו פוגשים עלי אדמות אינם יסודות טהורים, אך היסוד הראשי במה שנראה לנו כדומה לאדמה הוא יסוד האדמה, האוויר שאנו נושמים מורכב בעיקר מיסוד האוויר, וכן הלאה. מים ואדמה הם יסודות כבדים, ולפיכך הם מוצאים מנוחה רק כאשר הם מגיעים למרכז היקום. האוויר והאש נוטים להתרומם, ומקומם הראוי הוא בתחום שמעל כדור הארץ. אך גופים שמימיים כמו השמש, הכוכבים וכוכבי הלכת עשויים מיסוד חמישי – "המהות החמישית" (quintessence) או ה"אֶתֶר" (ether) – חומר שאינו ברי־השחתה ושהעקרונות הפיזיקליים החלים עליו שונים. וכך, בעוד שהאדמה נוטה ליפול עד הגיעה למרכז היקום, ובעוד שהאוויר והאש נוטים לעלות, השמים וגופיהם נעים באופן טבעי במעגלים מושלמים, והחומר שממנו הם עשויים הוא מושלם ובלתי משתנה.

היקום סבב אפוא סביב הארץ, המקום שבו חיו בני האדם, ובמובן מילולי זה הקוסמולוגיה שלפני קופרניקוס הייתה אנתרופוצנטרית. אך המיקום המיוחד הזה לא העיד בהכרח על סגולות מיוחדות. המין האנושי וסביבתו הארצית אמנם נתפסו ככרואים יחידניים של האל היהודי־נוצרי, אך ביחס לשמים ולחיים שלאחר המוות, החיים עלי אדמות נחוו כאומללים ומושחתים. מרכזו האמיתי של היקום היה הגיהנום. בסוף המאה ה־16 תיאר המסאי הצרפתי הספקן מישל דה מונטיין (Montaigne, 1533-92) – שקיבל עדיין את שיטת תלמי – את מקום מושבם של בני האדם כ"ביצת המדמנה של העולם, החלק הרע, השפל וחסר החיים ביותר ביקום, הקומה התחתונה של הבית". ואפילו בשנת 1640 הכיר אחד מתומכיו האנגלים של קופרניקוס בכוחה של טענה נגד ההליוצנטריות שרווחה בזמנו, טענה היוצאת מ"עליבותה של ארצנו, מכיוון שזו מורכבת מחומר איום ושפל יותר מכל חלק אחר של העולם; ולפיכך יש למקמה

וילקינס (Wilkins, 1614-72) מאמר שמטרתו "להוכיח את סבירותו של עולם שבו החיים אפשריים" על פני הירח.

התפיסה האנושית הפשוטה רואה את הארץ כעטופה ברקיע חצי-כדורי ועמוס כוכבים, אך האסטרונומים המודרניים מתחו כמעט עד אין קץ את גבולותיו של היקום. כאשר הפנה גלילאו את הטלסקופ לעבר הכוכבים, הוא ראה שהם רבים מספור, רבים הרבה יותר ממה שניתן לראות בעין בלתי מזוינת. לשלושת הכוכבים המוכרים בחגורתו של הצייד הוסיף גלילאו כשמונים כוכבים חדשים (תרשים 5). כמה כוכבים ערפיליים הפכו עתה לשבילי חלב קטנים. גלילאו שם לב גם שבניגוד לירח ולכוכבי הלכת, הכוכבים לא נראו גדולים הרבה יותר דרך עדשת הטלסקופ. אף על פי שגלילאו עצמו היסס בנקודה זו, ניתן היה להסיק מכך שהכוכבים רחוקים עד מאוד. תפיסה זו תמכה בעמדה הקופרניקאית בכך שהסבירה את היעדרו של ההיסט¹², שאם לא כן, בהתחשב בתנועת כדור הארץ, היה ניתן לצפות לו. גילויים הדרמטי של ירחים הנעים סביב כוכב צדק, גם זה גילוי של גלילאו, הוסיף אמינות לשיטתו של קופרניקוס בכך שהראה שהיחסים בין כדור הארץ לירח אינם מיוחדים במינם.

האסטרונומיה המסורתית נטתה לטעון בעד יקום סופי, שבו כל אחת מהספרות השמימיות סובבת את כדור הארץ הסטטי והמערכת השמימית כולה מסתובבת על צירה פעם בעשרים וארבע שעות. במערכת זו מרחקם של הכוכבים לא יכול היה להיות אינסופי, שכן אילו היה אינסופי, הספרה הנושאת אותם הייתה צריכה לנוע במהירות אינסופית – דבר שנתפס כאבסורד פיזיקלי. מאידך גיסא, קופרניקוס עצמו טען שהכוכבים קבועים בחלל, ואף על פי שהוא עצמו רק עמד על כך שהם רחוקים עד מאוד, עתה לא הייתה שום סיבה פיזיקלית להניח שמרחקם מהארץ אינו אינסופי. כמה מסנגוריה המאוחרים יותר של השיטה הקופרניקאית אכן טענו שספרת הכוכבים "קבועה במרחק אינסופי". וכך, אף על



5. "על אודות רבבות כוכבים קטנים הניתנים לגילוי באמצעות הטלסקופ". איור זה נכלל בספר *Micrographia* של הנסיין האנגלי רוברט הוק (Hooke, 1635-1703), שראה אור בשנת 1665. בעין בלתי מזוינת ניתן לראות רק שבעה מבין כוכבי הפליאדות. באמצעות טלסקופ מוקדם יותר, הצליח גלילאו לזהות שלושים ושישה כוכבים. בימין ובמרכז האיור של הוק משורטטים שבעים ושמונה כוכבים שהצליח לראות באמצעות טלסקופ באורך ארבעה מטרים; ניתן להעריך את גודלם על פי קנה המידה שבפינה השמאלית התחתונה. יכולת זו נתפסה כסממן אחד לכוחה הגדל במהירות של הראייה בעזרת עדשות במהלך המאה ה-17, והוק הביע ביטחון ש"באמצעות משקפות ארוכות יותר [...] אולי נוכל לגלות רבבות כוכבים קטנים נוספים שעד כה אינם נראים לעינינו".

התנועה הכללית של הפיזיקה האריסטוטלית לעומת זו ה"מורדרנית". עבור אריסטו וחסידיו מבין הפילוסופים של ימי הביניים וראשית העת החדשה, לכל אחד מהיסודות – אדמה, אוויר, מים ואש – "תנועה טבעית" משלו, אופן שבו הוא מתנועע "לפי טבעו". כפי שראינו, עבור יסוד האדמה כיוון התנועה הטבעית היה מטה, בקו ישר לעבר מרכז הארץ. גוף אדמתי ייפול מטה, אלא אם כן ייתקל במכשול שיעצור אותו או בהדף שיניע אותו בכיוון אחר. התנועה הטבעית מובילה למקום הטבעי. כמובן, אריסטו ידע היטב שתנועות בכיוונים אחרים הן בגדר האפשרות. תנועות כאלה כונו "תנועות מאולצות", תנועות שבניגוד לטבעו של גוף, ואותן היה צורך להסביר באמצעות פעולתם של כוחות חיצוניים, כגון הכוח שמפעיל אדם על אבן כאשר הוא משליך אותה כלפי מעלה או במקביל לפני הארץ. אך איננו יכולים ללמוד על תנועות טבעיות מתוך חקירה של תנועות מלאכותיות הנכפות על הגוף מבחוץ.

כך, עבור אריסטו וחסידיו כל תנועה טבעית היא בעלת אופי התפתחותי. גופים נעים באופן טבעי במטרה להגשים את טבעם, להוציאו מן הכוח אל הפועל, לנוע לעבר מקומם הטבעי. כמובן זה, הפיזיקה האריסטוטלית שמה לה את הביולוגיה כמודל והפעילה קטגוריות הסבריות דומות לאלה שבהן השתמשה להבנתם של יצורים חיים. כפי שהתפתחותו של הבלוט לעץ אלון היא תמורה מן הכוח אל הפועל, כך גם נפילתה של אבן מורמת מהווה מימוש של פוטנציאל, הגשמה של "טבע". הקשר בין ההסברים המסורתיים לתנועה בטבע לבין המרקם של הניסיון האנושי בולט. בני האדם סיפקו הסברים טליאולוגיים – מוכוונים תכלית – לתנועותיהם שלהם. מדוע נע הרועה לעבר בקתו? מכיוון ששם לו למטרה להגיע למחוז חפצו. מדוע מזנקות הלהבות מתוך המדורה? מכיוון שהן מבקשות להגיע למקומן הטבעי. זהו בדיוק המוכן שבו הפיזיקה המסורתית ערב המהפכה המדעית תאמה את מידותיו של האדם. ברור שאופיין הבסיסי של הקטגוריות ששימשו להסביר את

פי שרעיון היקום האינסופי הופיע לראשונה בעת העתיקה, ואף על פי שכמה קופרניקאים הסתייגו ממנו בתוקף, רק במאות ה-16 וה-17 החלה התרבות האירופית להתמודד עם האפשרות של יקום אינסופי, אפשרות הקוראת תיגר על ממדיו הנוחים יותר של הניסיון היומיומי. עכשיו היה זה אפשרי שעולמם של בני האדם אינו אלא גרגר אבק ביקום שגודלו מעבר לכל דמיון. ואף על פי שאסטרונומים מומחים רבים לא הוטרדו כלל מהאפשרות של יקום אינסופי (וכמה מהם אפילו היללו את נשגבותו), לא כך היה הדבר לגבי הדיוטות משכילים. רבים הביעו אי-נחת אל מול האינסוף, לנוכח ערעורן של מערכות הידע הקוסמולוגי המסורתיות ודחיקתו של כדור הארץ מהמרכז. אחד הרהוטים מבין אלה היה איש הדת והמשורר האנגלי ג'ון דון (Donne):

חכמת ימינו בפקפוק הכל חבקה,
אפילו להבות יסוד-האש חנקה;
אברו חמה וארץ, לא נמצא אדם
שיספר לנו היכן יש לחפשם.
מיצה רוב-עם תבלנו והפנה עיניו
אל כוכבים ורקיעים שמעליו,
שם יחפש עולם חדש, אך מסתבר
שגם הוא לאטומים התפורר.
הכל רוסק לרסיסים, אין עוד אחדות;
פרח הצדק, נסו כל קשרי הולמות.

ובצרפת, המתמטיקאי והפילוסוף בלז פסקל (Pascal, 1623-62) זיהה בממרה מפורסמת את השפעותיו המבלבלות של רעיון החלל האינסופי על המורל: "Le silence éternel de ces espaces infinis" ("שתיקתו הנצחית של חלל אינסופי זה מבהילה אותי").¹³

הפילוסופיה החדשה תקפה את ההיגיון המקובל לא רק ברמת היקום, אלא גם ברמה הארצית ביותר. ניקח כדוגמה את תפיסת

תנועתן של אבנים היה דומה לזה של הקטגוריות ששימשו להסביר את תנועתנו־שלנו. מסיבה זו ניתן לומר, מבלי לחטוא באי־דיוק בוטה, שתפיסות מסורתיות כאלה של החומר הן "אנימיסטיות", כלומר שהן מייחסות תכונות נפשיות (המילה הלטינית anima משמעותה נשמה) לעצמים ולתהליכים טבעיים.¹⁴

תכונותיה הטליאולוגיות והאנימיסטיות של פיזיקת התנועה המסורתית משכו אליהן את ביקורתה ואף את לעגה של פילוסופיית הטבע החדשה של המאה ה־17, שציירה את התפיסה המסורתית כאבסורדית ובלתי מובנת. אותם המאפיינים שהעניקו לפיזיקה את אחיזתה בהיגיון הפשוט במשך מאות בשנים נתפסו עתה כסממנים של כישלונה. עצם האמירה שפילוסופיית הטבע היא טליאולוגית נתפסה כביקורת לגיטימית. הפילוסוף האנגלי תומס הובס (Hobbes, 1588-1679) היה אחד מבני המאה ה־17 שביקרו את האריסטוטליות תוך ערעור על האמונות הפיזיקליות המסורתיות, ומשכו בסרקזם את תשומת הלב לאנתרופומורפיזם שלהן. האריסטוטלים אומרים שגופים נופלים מכיוון שהם כבדים: "אך אם תשאל למה כוונתם בדברם על כובד, הם יגדירו אותו כתשוקה לרדת אל מרכז הארץ. כך שהסיבה שדברים שוקעים מטה היא תשוקתם להיות למטה: או במילים אחרות, גופים נופלים או מתרוממים מכיוון שהם נופלים או מתרוממים. [...] כאילו לאבנים ולמתכות היו רצונות, או כאילו יכלו לזהות את המקום שברצונן להגיע אליו, כמו האדם".

1. [הקושי בתרגום המילה האנגלית mind לעברית ידוע. לשם הבהירות והדיוק, תורגמה המילה לכל אורך הספר כ"נפש", והמושג המשלים אותה במובנים רבים, soul, תורגם כ"נשמה" (ההערות למהדורה העברית מאת המתרגם והעורך המדעי תופענה לאורך הספר בסוגריים מרובעים)].
2. "ראשית העת החדשה" (early modern period) הוא מושג המשמש היסטוריונים לציון התקופה שנמשכה בערך מ־1550 ועד 1800 באירופה. כאן אשתמש במושג במובן מוגבל מעט יותר, המתייחס לתקופה המסתיימת בסביבות 1700-1730. מאוחר יותר אשתמש במונחים "מודרני" ו"מודרניסטי" כיחס לסוגים מסוימים של ידע ופרקטיקה, שהחלו את דרכם במאה ה־16.
3. בשנות ה־30 דן הפילוסוף הצרפתי גסטון בשלאר (Bachelard) ב"גלגולים" (mutations, כלומר אי־רציפויות בסדר גודל נרחב) בהתפתחות המבנה המושגי של המדע. קוירה אימץ עד מהרה מושג זה: "המהפכה המדעית של המאה ה־17 הייתה ללא כל ספק גלגול שכזה [...] זו הייתה תמורה אינטלקטואלית עמוקה שהפזיקה המודרנית [...] היא לה ביטוי ופרי".
4. במאה ה־17 המילה "מדע" (כלומר, scientia הלטינית, שמשמעותה ידע או חוכמה, ונגזרותיה בשפות האירופיות האחרות) תיארה בדרך כלל כל גוף ידע שכוונן כראוי (כלומר ידע של אמיתות אוניברסליות והכרחיות). חקר הדברים הקיימים בטבע וחקר המבנה הסיבתי של העולם הטבעי היו ידועים בהתאמה כ"היסטוריה הטבע" (natural history) ו"פילוסופיית הטבע" (natural philosophy). בספר זה אדבק לרוב בנוהג של ראשית העת החדשה, ואסווג את החוקרים הרלוונטיים כפילוסופים של הטבע, היסטוריונים של הטבע, מתמטיקאים, אסטרונומים, כימאים וכן הלאה. המילה "מדען" (scientist) נטבעה רק במאה ה־19 ולא נכנסה לשימוש נרחב עד לתחילת המאה ה־20.
5. במקרים רבים אני עושה שימוש בחומרים מאנגליה לא כדי לטעון בעד מרכזיותן של התפתחויות ייחודיות באנגליה, אלא בתור הדגמה מקומית לנטיות שבאופן כללי היו נפוצות ברחבי אירופה.
6. הסכולסטיקה הייתה גרסה של פילוסופיה אריסטוטלית, שפיתח בין היתר תומס מאקווינס (בסביבות 1225-74) ואשר נלמדה באוניברסיטאות ("אסכולות") של ימי הביניים. אנשי האסכולות בנונו לעתים סכולסטיקנים.

7. למעשה, מהימנותן ואמיתותן של התצפיות הטלסקופיות שערך גלילאו – על הירח והכוכבים, נוסף על השמש – לא היו מובנות מאליהן בעיני כל החוקרים המוסמכים. למשל, התגלעו קשיים ניכרים בניסיון לשכנע את הפילוסופים בכך שהתופעות לכאורה אינן אשליה שייצר הטלסקופ. בפרק 2 אתאר כמה מההסתייגויות הללו, כמו גם כמה מהבעיות הנובעות מהצורך באימות ציבורי של תצפיות שערך אדם יחיד בגפו.
8. ובתרגומו העברי של ש.צ. דוידוביץ (ירושלים: תרשיש, תשי"ד).
9. סטיינז (Staines) היה כפר במרחק של כשלושים קילומטר מהסיטי של לונדון, היום ליד שדה התעופה היתרו. יש להעיר שהמחקר ההיסטורי מן הזמן האחרון מראה שההתנסות האירופית בעולם החדש לא הייתה בלתי אמצעית, אלא מותנה בצפיות שיצרו מסורות טקסטואליות עתיקות יומין לגבי אופיו האפשרי של עולם כזה.
10. במובן אחר וחשוב, המדע החדש של המאה ה־17 דווקא שימר את האנתרופוצנטריות. כפי שנראה בפרק 3, תפיסות מכניות של הטבע שימרו את מעמדן הייחודי של בני האדם בתוך הטבע הנברא, שחלקיו הלא אנושיים עוצבו במיוחד בידי האל לשימושו ולמגוריו של האדם. אנתרופוצנטריות מסוג זה נותרה מאפיין מרכזי של המדע עד התקבלותו של הדרוויניזם בסוף המאה ה־19.
11. למעשה, קופרניקוס הסיק שכדור הארץ נע גם באופן שלישי, במעין נדידה אטית ודמוית־חרוט על צירו. נדידה זו הייתה אמורה להסביר את השינויים הקטנים בתצפיות במיקומם של הכוכבים לאורך אלפי שנים. טיפול מקיף באמת באסטרונומיה של תקופת המהפכה המדעית יחייב גם התייחסות ל"פשרה" בין תלמי וקופרניקוס שהציע התצפיתן האסטרונומי המוכשר ביותר של סוף המאה ה־16, הרני טיכו בראהה (Brahe, 1546-1601). במערכת של טיכו, כוכבי הלכת סובבים סביב השמש וזו בתורה סובבת את כדור הארץ הניצב במרכז. למעשה, קופרניקאים מובילים רבים עסקו יותר בהפרכת הסכמה של טיכו – שזכתה לתמיכתם של חוקרים רבים בקרב מסדר הישועים הקתולי – מאשר בשיטתו של תלמי.
12. ההיסט (parallax) הוא השינוי בזווית הנצפית כאשר אנו רואים עצם משתי נקודות שונות. ההיסט השנתי של גרם שמים קרוב, סביר להניח, יהיה משמעותי, בעוד שההיסט של עצם רחוק מאוד עשוי להיות קטן מכדי להבחין בו. קופרניקוס ובני זמנו לא הצליחו לאתר כל היסט שנתי עבור הכוכבים הקבועים.
13. מילים אלה לא נועדו להביע את עמדתו של פסקל עצמו כפילוסוף, אלא את דעתם של ה"ליברטינים" בני זמנו.

14. היסטוריונים מתארים דפוס אמונה כאלה גם במונח "הילוזואיזם" (hillozoism), המורכב ממילים יווניות שמשמעותן "חומר" ו"חיים". ההתייחסות לסדר הגודל האנושי של הפזיקה האריסטוטלית משקפת בחלקה אפיון שפותח תוך כרי פולמוס בידי יריביה בני המאה ה־17. הטענה בדבר התאמת הקטגוריות ההסבריות הפזיקליות לאלה האנושיות אמנם תקפה, אך יש לשים לב לכך שאויסטו עצמו הוהיר מפני ההיתפסות למחשבה ש"הטבע מקבל החלטות".