

תוכן העניינים

ז	תודות
1	מבוא
7	לוח שנים של השלבים השונים במהפכה הקופרניקאית
9	חלק ראשון: האסטרונומיה היוונית
11	פרק א: קצת אסטרונומיה בסיסית
18	פרק ב: התפיסה הגיאוצנטרית – כדור הארץ במרכז
25	פרק ג: מודל הגלגלים הולך ומסתבך
41	חלק שני: קופרניקוס והמודל ההליוצנטרי
43	פרק ד: תקופתו של קופרניקוס
54	פרק ה: קופרניקוס וחוכמת ה"הערות"
61	פרק ו: המודל ההליוצנטרי
73	פרק ז: הבאת הספר לדפוס
86	פרק ח: הספר על הסיבובים של הכדורים השמימיים
106	פרק ט: המשמעות של התיאוריה הקופרניקאית
118	פרק י: היקום האינסופי – תומס דיגס וג'ורדנו ברוננו
	חלק שלישי: התיאוריה ההליוצנטרית בדורות שאחרי
135	קופרניקוס
	פרק יא: טיכו ברהה ויוהאנס קפלר – אליפטות במקום
137	מעגלים

- פרק יב: עדויות לטובת קופרניקוס: גלילאו גליליי
157 והטלסקופ
- פרק יג: קופרניקוס, גלילאו והכנסייה
178

- חלק רביעי: הניצחון של המהפכה הקופרניקאית**
- 197 **באסטרונומיה המודרנית**
- 199 פרק יד: מדידת המרחק אל כוכבי השבת
- פרק טו: הניצחון המוחץ של קופרניקוס: מערכות
205 שמש אחרות במרחבי החלל
- 217 אפילו
- 222 ביבליוגרפיה

מבוא

במשך אלפי שנים, מאז עמדה האנושות על דעתה, דמיינו בני האדם את השמים ככיפה עגולה, כחולה ביום ושחורה בלילה, המקיפה את כדור הארץ. הכיפה נראתה עשויה מחומר שקוף ובו משובצים הכוכבים. מעל לכיפת השמים (שם-מים) נמצא מאגר אינסופי של מים שממנו בא הגשם, והוא זה המשווה לכיפה את צבעה הכחול. כיפת השמים מסתובבת מסביב לכדור הארץ העומד במרכז, והשמש וכוכבי הלכת נעים בחלל שבין הכיפה ובין כדור הארץ. הספר שלפניכם מתאר את המהפכה המדעית שבסופה הבינו האסטרונומים, ובעקבותיהם האנושות כולה, כי תנועות הכיפה והשמש הן תנועות מדומות ונובעות מסיבוב כדור הארץ סביב צירו ותנועתו מסביב לשמש. כיפת השמים אינה קיימת במציאות והיא פרי תעתוע אופטי; הכוכבים משייטים להם במרחקים אינסופיים בחלל וכדור הארץ הוא זה המקיף את השמש.

את המהפכה התניע הספר על הסיבובים של כדורי השמים (*De revolutionibus orbium coelestium*), שיצא לאור בשנת 1543, שעה שהמחבר, ניקולאוס קופרניקוס (Copernicus, 1473-1543), שכב על ערש דווי. התיאוריה המהפכנית הייתה כרוכה בשינוי של התפיסה היסודית – הפרדיגמה – של המדע, וחייבה שינוי מחשבתי עמוק. שינוי תפיסת עולם הוא תהליך משברי אצל כל אדם, ובמיוחד כאשר התפיסה הקודמת יסודית ועמוקה. משבר כזה עברה הקהילה המדעית כשהתמודדה עם התיאוריה החדשה, שסתרה את יסודות המדע העתיק. המצאת הטלסקופ על ידי גלילאו גליליי, כשישים שנה אחרי מותו של קופרניקוס, אפשרה לאסטרונומים של אותם

ימים לראות פרטים חדשים של כוכבי הלכת ולהתחיל בתהליך ארוך של קבלת התיאוריה הקופרניקאית.

הדי המהפכה שחולל הספר התפשטו הרבה אל מעבר לאסטרונומיה. הזעזוע שגרמו הובילו בסופו של דבר ליצירת פיזיקה חדשה, מודרנית, והייתה להם השפעה עמוקה על מדעי הטבע בכללם ועל תפיסת האדם את מקומו ביקום. קורותיה של המהפכה הקופרניקאית הם חלק חשוב מן ההיסטוריה האינטלקטואלית של תרבות המערב, הכוללת בתוכה גם את התפתחותם של מדעי הטבע, ובמיוחד את גלגוליה של אחת המהפכות החשובות ביותר של הפיזיקה והאסטרונומיה.

ההבנה שכדור הארץ אינו עומד במרכז אלא נע מסביב לשמש הביאה אתה את ההכרה כי גודלו של היקום הוא עצום, והוא משתרע הרחק מעבר לגבולותיה של מערכת השמש. המודל ההליוצנטרי, שעל פיו השמש (הֶלְיוֹס) עומדת במרכז, הוביל את האסטרונומים בתוך פחות ממאה שנה להשערה כי כוכבי השבת הם שמשות בעצמם הפולטים אור וחום כמו השמש שלנו, ורק בגלל מרחקם העצום הם נראים כה חלשים. "מערכת השמש", מושג בסיסי המוכר לכל המתעניין באסטרונומיה בימינו, הוא מושג קופרניקאי. זהו רעיון המאפשר להסתכל על העולם מבחוץ, ולראות את השמש וכוכבי הלכת כמערכת אחת. מחוץ למערכת השמש קיים חלל ענק שבו נמצאים הכוכבים האחרים והשמשות האחרות.

מכאן קצרה הדרך להרהורים על האפשרות של כוכבי לכת מחוץ למערכת השמש שלנו החגים סביב שמשות אחרות ביקום שמסביבנו. מחשבה בדבר קיום של אובייקטים כאלה בחלל יכולה הייתה להופיע רק אחרי הפנמתה של התיאוריה הקופרניקאית. רעיונות נועזים כאלה העלה ג'ורדנו ברוננו, שהאמין באינסופיות של היקום, פחות ממאה שנה אחרי פרסום על הסיבובים. הכנסייה הקתולית העלתה את ברוננו על המוקד בחודשים הראשונים של המאה השבע-עשרה, בשמו של האל הנוצרי, כמוכזב. אבל שריפתו של ברוננו לא מנעה מן הרעיונות שלו להמשיך ולרחף בחלל התודעה של האסטרונומים.

ואכן, במאה התשע-עשרה הצליחו האסטרונומים לאסוף עדויות

חותכות כי כוכבי השבת הם שמשות כמו השמש שלנו, ובסופה של המאה העשרים, כמעט 400 שנה אחרי שריפתו של ברוננו, הצליחו האסטרונומים לגלות כוכבי לכת מסביב לשמשות מרוחקות אחרות. אפשר להסתכל על הגילויים של השנים האחרונות כעל חלקה השני של המהפכה הקופרניקאית – מציאת הוכחות תצפיתיות לכך שמערכת השמש הקופרניקאית אינה ייחודית במרחבי החלל. התהליך הארוך של קבלת המהפכה הקופרניקאית על היבטיה דומה לתהליך ההתבגרות האנושי, שבו לומד התינוק בתהליך אטי ומורכב שהוא אינו עומד במרכז העולם.

יתרה מזאת: כתוצאה ממחקר מקיף שמתבצע בשנים האחרונות מתגבשת ההכרה כי לרוב השמשות יש כוכבי לכת מסביבם, וחלק מהם דומה לאלה המקיפים את השמש שלנו. מאחר ואנו יודעים היום כי הגלקסיה שלנו מכילה קרוב למאה מיליארד שמשות, סביר להניח כי בחלק מכוכבי הלכת שבגלקסיה שוררים תנאים הדרושים לקיומם של חיים. ייתכן כי האסטרונומיה שוב נמצאת לפני פריצת דרך מסעירה – זיהוי כוכבי לכת מחוץ למערכת השמש המראים סימנים לקיומם של חיים אחרים, כמו שהזהחזה ברוננו לפני יותר מ־400 שנה, אחרי שאימץ את התיאוריה הקופרניקאית. האם אנו עומדים לפני השלב השלישי של המהפכה הקופרניקאית, שבו ניווכח כי תופעת החיים, ואולי אפילו חיים תבוניים, אינה כה ייחודית כמו שנטינו לחשוב? קשה לשער מה יהיו ההשלכות של גילויים כאלה על החשיבה האנושית.

הספר שלפניכם מספר את סיפורה של המהפכה הקופרניקאית כשהוא שוזר יחד שלושה חוטים של עלילה: הופעתה וקבלתה של התיאוריה ההליוצנטרית, שלפיה השמש עומדת במרכז וסביבה חגים כוכב הלכת; פיתוח הטלסקופ על ידי גלילאו, שהייתה לו תרומה חשובה לקבלת המודל של קופרניקוס, ומאז ועד היום הוא הכלי העיקרי שעליו נשענת האסטרונומיה המודרנית; והקונפליקט המדעי־דתני, שיש לו שורשים כבר בספרו של קופרניקוס, והוא נמשך עד ימינו אלה. במאות החמש־עשרה עד השבע־עשרה אי אפשר היה

להפריד בין התפיסה המדעית ובין העולם הרוחני שבו היו שרויים האסטרונומים. ההפרדה של ימינו לא הייתה קיימת אז, וקשה להבין את ההיסטוריה של המהפכה הקופרניקאית בלי להבין את עולמם הדתי והרוחני של המדענים. לכן, הדיון כאן יעסוק בקצרה גם בעולמם הרוחני של גיבורי העלילה.

על הסיבובים של כדורי השמים עוסק בכוכבי הלכת שבמערכת השמש, והטיעונים הטכניים המסובכים הכלולים בו דיברו אל לבם של אסטרונומים מעטים במאה השש־עשרה. הספר מציג את טענותיו של קופרניקוס בצורה פשוטה, המנגישה אותם לקורא בן זמננו שאיננו בקיא באסטרונומיה, בניסיון לבנות גשר מעל התהום המפרידה בין המדענים ובין אנשי מדעי הרוח.

החלק הראשון של הספר, פרקים א-ג, מתאר את האסטרונומיה שלפני קופרניקוס. זהו חלק טכני במהותו, והקוראים הלהוטים אחר גלגוליה של העלילה מוזמנים לרפרף על פני החלק הזה ולגשת מיד לקריאתו של החלק השני. אחרי הצגת העולם התרבותי שבתוכו פעל קופרניקוס בפרק ד, פרקים ה-ט מפרטים את המודל ההליוצנטרי החדש. התיאור מלווה את התהליך הארוך והסבוך שהביא את קופרניקוס בסופו של דבר לפרסם את ספרו.

חלקו השלישי של הספר, פרקים י-יג, סוקר את התהליך המורכב של פיתוח התיאוריה ההליוצנטרית ועידונה על ידי האסטרונומים בדורות שאחרי קופרניקוס; איסוף מדידות חדשות בעזרת מכשור מתקדם ובמיוחד בעזרת הטלסקופ, שהוביל בסופו של דבר לקבלת התיאוריה החדשה. חלק זה של הספר כולל גם את תיאור ההתנגדות המרה של הכנסייה הקתולית למודל ההליוצנטרי במאה השבע־עשרה ואת מאבקה בגלילאו.

חלקו הרביעי של הספר, פרקים יד-טו, מתאר כיצד אישרו האסטרונומים כי אכן כוכבי השבת הם שמשות כמו זו שלנו, וכיצד בשנות התשעים של המאה העשרים הצליחו האסטרונומים לגלות כוכבי לכת מסביב לשמשות מרוחקות אחרות. כאסטרונום החוקר כוכבים כפולים וכוכבי לכת מחוץ למערכת השמש הייתה לי הזכות

לקחת חלק בפרק זה של העלילה מראשיתו. על כן יתואר חלק מן השלב השני של המהפכה מנקודת מבטי האישה. לבסוף, הספר מזכיר בקצרה את האפשרות של השלב השלישי של המהפכה הקופרניקאית בדורות הקרובים – גילוי חיים מחוץ לכדור הארץ.

פרק ד

תקופתו של קופרניקוס

כדי להבין את הרקע להופעתה של תיאוריה אסטרונומית מהפכנית שעתידה לשנות בצורה עמוקה את השקפתנו על היקום כדאי להכיר את האווירה האינטלקטואלית של המאות החמש-עשרה והשש-עשרה שבהן חי ופעל קופרניקוס. פרק זה יסקור בקיצור את רוחה של אותה תקופה.

הולדתו של קופרניקוס, בשנת 1473, התרחשה בלב לבה של תקופה המכונה "העת החדשה המוקדמת", תקופה שבה עברה אירופה מהפכה עמוקה, המאופיינת, בין השאר, בארבעה תהליכים אינטנסיביים: פריחת הרנסנס באיטליה, שהביאה להתעניינות מחדשת בהשקפת העולם הקלאסית והפכה את האדם והחופש האינטלקטואלי שלו למרכז העניין של ההוגים והיוצרים של אירופה; התבססותה של מהפכת הדפוס שהחלה בגרמניה והביאה ליצירת ערוצים חדשים ומהירים של החלפת אינפורמציה ורעיונות; גילוי הארצות החדשות שמעבר לאוקיינוסים וההשתלטות עליהן, תהליך ששתי השחקניות המרכזיות בו היו ספרד ובעיקר פורטוגל, שתי הממלכות שבחצי האי האיברי; ולבסוף, מעט מאוחר יותר – הופעת הרפורמציה הפרוטסטנטית הנוצרית, גם היא בגרמניה, שגרמה לכך שפתאום היו לפני האדם האירופאי שתי אופציות של דתות ממוסדות: הקתולית והפרוטסטנטית. איטליה, גרמניה וחצי האי האיברי היו קודקודי המשולש הסוער והגועש שבו התרחשו באינטנסיביות ארבעת התהליכים שהזכרנו.

והנה, מחוץ למשולש הגיאוגרפי הזה, לחופי הים הבלטי, בקצווי העולם התרבותי של אז, הרחק מכל מרכז אינטלקטואלי פעיל, צמחה לה כמעט בחשאי תיאוריה אסטרונומית שעתידה לשנות מן היסוד את תפיסתנו את היקום, תיאוריה שפיתח קופרניקוס, לבלר כנסייתי שעבד כמעט בבדידות במשך קרוב לארבעים שנה. פרק זה יתאר בקיצור את ארבעת התהליכים האמורים שהכינו את הקרקע לפריצתה של התיאוריה המהפכנית אל מרכז הבימה של ההתרחשות האינטלקטואלית של אירופה במאה השש־עשרה.

הרנסנס

תקופת הרנסנס, שנמשכה לדעת רוב החוקרים במאות הארבע־עשרה עד השש־עשרה, צמחה באיטליה ומשם התפשטה לכל אירופה המערבית. התקופה מציינת התפתחות כלכלית של האזור ויציאה מתקופת השפל של ימי הביניים, שבאה בעקבות התמוטטותה של האימפריה הרומית. שמה של התקופה – רנסנס, לידה מחדש, כפי שנקראה על ידי האליטות התרבותיות של אותם ימים – מעיד על האתוס שבו האמינו מובילי השינוי התרבותי, שתפסו את עצמם כחווים לידה מחדש של הציוויליזציה והתרבות, לידה המחזירה עטרה ליושנה. החזרה היא אל התרבות היוונית והרומית של העת העתיקה, לעומת התרבות של ימי הביניים ששלטה באירופה באלף השנים שקדמו לרנסנס.

התרבות החדשה האמינה באדם וברוחו, בזכותו לשאוף להישגים ולאושר וביכולתו להבין את העולם ואת הטבע ללא התיווך של הכנסייה וההתגלות. האינטלקטואלים של הרנסנס היו מלאי סקרנות ותשוקה להבין את העולם החומרי ואת גופו של האדם במקום לעסוק במלאכים וקדושים. לפתע פתאום השתחרר פרץ של עוצמה ותעוזה שהתבטא בתחילה באמנות ועבר אחר כך אל המדעים. שתי דוגמאות בולטות משרדה הרפואה הן ויליאם הארווי (Harvey, 1578-1657),

מגלה מחזור הדם, ואנדריאס וסאליוס (Vesalius, 1514-1564), חלוץ האנטומיה האנושית, שברומה לקופרניקוס הוציא לאור גם הוא את ספרו פורץ הדרך על אודות המבנה של גוף האדם בשנת 1543. פרקטיקה מקובלת בחלק ממהפכות התרבות היא להציג את התהליך המהפכני כשיבה אל המקורות הקדומים. הדבר נכון במיוחד כאשר המהפכה כרוכה בשינוי שקשה לקבל אותו, מפני שהוא מערער תפיסה יסודית ועמוקה של העולם המחשבתי. במקרים כאלה המהפכה עוטה על פניה מסכה המסתירה את השינוי העמוק שהיא מנסה לחולל, וטוענת בהיתממות, מודעת ולעתים לא מודעת, שהרעיונות המוצגים אינם חדשים ומהפכניים כפי שנראה במבט ראשון. זאת הייתה גם הטענה של מחוללי הרנסנס. לפי תפיסתם הם הובילו מהלך של שיבה אל העולם הקלאסי והאידיאלי של התרבות הרומית, ובעיקר ההלניסטית. גם קופרניקוס נקט פרקטיקה דומה. הוא טען כי התפיסה שהשמש עומדת במרכז העולם כבר הופיעה אצל אסטרונומים יוונים.

חלק מהפרקטיקה המהפכנית היא הסתמכות על כתבים עתיקים המייצגים את התרבות העתיקה שאליה מבקשת המהפכה לחזור, כתבים שנעלמו במשך דורות והתגלו פתאום. על פי הנרטיב של המהפכה, היעלמותם של הכתבים העתיקים מייצגת את הנסיגה מן התרבות האידיאלית העתיקה. גילויים מחדש של הטקסטים העתיקים מאפשר מגע בלתי אמצעי עם התרבות שנעלמה ושאליה שואפת המהפכה לחזור.

ואכן, תקופת הרנסנס הייתה משופעת בהופעה של ספרים מן התקופה ההלניסטית והרומית, שתורגמו מיוונית ומערבית ללטינית, שפת האינטלקטואלים של אירופה המערבית. תהליך זה הואץ בעקבות נפילת האימפריה הביזנטית ב-1453 בידי העות'מאנים, עשרים שנה לפני הולדתו של קופרניקוס. כתוצאה מכך הועתק מערבה המרכז הלימודי שבביזנטיון, שהיה בקשר הדוק עם תרבות האסלאם. גורל דומה היה גם לספר האסטרונומיה היסודי של התקופה ההלניסטית – "אלמאגסט". הוא תורגם ללטינית ב-1460 על ידי רגיומונטנוס

מגדולי האסטרונומים של הדור (Regiomontanus, 1436-1476). שלפני קופרניקוס, וכך נפתח מחדש אשנב אל האסטרונומיה של התקופה ההלניסטית. הופעת הספר בלטינית באירופה המערבית הייתה שלב הכרחי בהכנה למהפכה הקופרניקאית.

מרכיב מרכזי אחר של תרבות הרנסנס הוא פריחת האוניברסיטאות, שהראשונות שבהן הופיעו כבר בימי הביניים, כמוקד חדש המתחרה על הזכות להעברת הידע ולפיתוחו לעומת המנזרים והכנסייה, שהיו בעלי המונופול על הידע בימי הביניים. אפשר להסתכל כדוגמה על האוניברסיטה של פדובה באיטליה, שיסדו בשנת 1222 סטודנטים שפרשו מאוניברסיטת בולוניה מפני שבחלו בפיקוח הכנסייתי והמלכותי, ונוהלה מאז על ידם. האוניברסיטה נקראה "אוניברסיטה חופשית", וסיסמתה הייתה "החופש של פדובה הוא לכולם" (*Universa Universis Patavina Libertas*), וברוח זאת הייתה האוניברסיטה הראשונה שפתחה את שעריה ליהודים. היא הייתה מפורסמת בלימודי הרפואה המתקדמים שלה; אנדריאס וסאליוס, האיש שחולל את המהפכה הרפואית של העת החדשה, למד ולימד גם הוא באוניברסיטת פדובה. רופאים יהודים רבים רכשו את השכלתם הרפואית והכללית בפדובה, ושימשו סוכנים של ראשית ההשכלה בחברה היהודית ברחבי אירופה.

האוניברסיטה של פדובה עתידה למלא תפקיד מרכזי במהפכה הקופרניקאית. שם למד קופרניקוס עצמו כשנסע מפולין מולדתו לאיטליה כדי להשלים את השכלתו, שם רכש חלק מידעותיו באסטרונומיה, ושם כנראה הפנים את הרעיונות הרנסנסיים שכה אפיינו את חשיבתו. שם גם שהה ג'ורדנו ברנו (Bruno, 1548-1600), שיש לו תפקיד מרכזי בעלילה של המהפכה הקופרניקאית. ברנו בילה בפדובה שנים אחדות, בניסיון לקבל משרת מרצה. משכשלו מאמציו עבר לוונציה להסתופף בחצרו של אציל מקומי, והוא זה שהסגירו לידי האינקוויזיציה הקתולית וחרץ בסופו של דבר את גורלו.

גם גלילאו גליליי (Galilei, 1564-1642), האיש המרכזי שהוביל

את המהפכה הקופרניקאית בדור שאחרי קופרניקוס, בילה בפדובה שמונה-עשרה שנה, משנת 1598 ועד 1610, כמרצה באוניברסיטה. שם פיתח גלילאו את הטלסקופ הראשון בעולם ושם גילה את התגליות האסטרונומיות המהפכניות שהביאו את ההוכחות הראשונות לתיאוריה ההליוצנטרית. בניגוד לברונו, גלילאו עזב את אוניברסיטת פדובה מרצונו, ואחרי שקיבל הצעה מפתה עבר לפירנצה. גם המהלך הזה הוביל את גלילאו בסופו של דבר לידי האינקוויזיציה. אוניברסיטה אחרת, שמילאה תפקיד חשוב בתולדות הרוח של העת החדשה מצפון לאלפים, היא האוניברסיטה של ויטנברג, שנוסדה בשנת 1502, כ־300 שנה אחרי האוניברסיטה של פדובה. אל גרמניה הגיעה רוח הרנסנס מאוחר יותר. מרטין לותר (Luther, 1483-1546), מחולל הרפורמציה שעוד ידובר בו, היה מורה באוניברסיטה; פיליפ מלנכתון (Melancthon, 1497-1560), ההוגה המרכזי של התנועה הדתית החדשה, עמד בראש האוניברסיטה, ורטיקוס (Rheticus, 1514-1574), גיבור מרכזי בעלילה של קופרניקוס, קיבל שם את משרתו האקדמית הראשונה.

הדפוס

המצאת הדפוס, עניין טכני לחלוטין לכאורה, שינתה בצורה עמוקה את הדרך שבה התפתח גוף הידע של העולם המערבי. מהפכת הדפוס החלה עם הרפסת כמאתיים עותקים של הספר הראשון, "הביבליה של גוטנברג", שהושלמה במיינץ שבגרמניה על ידי יוהאן גוטנברג (Gutenberg, 1397?-1468), כנראה בשנת 1454, כעשרים שנה לפני הולדתו של קופרניקוס. בתוך כמה עשרות שנים התפתח ענף הדפוס במהירות, ובתי דפוס וחנויות לממכר ספרים החלו פועלים במרכזי הידע של אירופה המערבית, מצפון לאלפים ומדרום להם. לפני המצאת הדפוס הועבר הידע האנושי בעל פה, על ידי מורים ותלמידים שנאלצו כמובן לשהות באותו מקום, או על ידי מכתבים,