

תוכן העניינים

ז	שלמי תודה
1	הקדמה
9	א: פרקים מקדימים
9	ילדות ונעורים
15	לאיזה עולם פיזיקה נכנס אלברט הסטורנט?
22	החיים בברן
27	ב: "שנת הפלאות"
30	האור – גלים או חלקיקים?
41	האם האטומים קיימים באמת?
48	מרחב וזמן – הכול תלוי בצופה
59	כמה אנרגיה יש בגרם של חומר?
64	ממשרד הפטנטים לקדמת הבמה
67	ג: מהפכת היחסות נמשכת
68	לקראת תורת יחסות כללית – צעדים ראשונים
77	הגאומטריה היא חלק מן הפיזיקה
83	דרך ארוכה ומפותלת
91	סוף טוב – הדרמה של נובמבר 1915
99	מבחנים תצפיתיים
108	היקום קבוע או מתפשט?

- 115 ד: שנים של שמרנות עיקשת
116 תורת הקוונטים – סירוב לקבל את דעת הרוב
123 "פעולת רוח רפאים מרחוק"
127 החתירה לתיאוריה מאוחדת
- 133 ה: אלברט איינשטיין – פרקים לדמותו
133 נאמנות לתפיסת עולם כוללת
135 פילוסוף-מדען
138 פעילות ציבורית-פוליטית
142 זהותו היהודית
- 149 קריאה מומלצת בעברית

הקדמה

בתחילת המאה העשרים היה אלברט איינשטיין בן ה-21 בחיפוש נואש אחר משרה שתאפשר לו להתפרנס ולפרנס את המשפחה שתכנן להקים עם חברתו לספסל הלימודים מילבה מאריץ' (Marić). בשני העשורים הבאים, שני העשורים הראשונים של המאה, שבסופם הוענק לו פרס נובל, הוא שינה מן היסוד את תפיסת העולם הפיזיקלי המקובלת, ובסופה בחר בו השבועון הנודע *Times* לאיש המאה. הוא הקדים בדירוג את מהאטמה גנדי ואת פרנקלין רוזוולט. גם היום, שבעה עשורים אחרי מותו, הוא עדיין מעורר עניין ומצית את הדמיון בציבור הרחב, הרבה מעבר לחוגים המדעיים. מיתוסים רבים נקשרו בו ודיוקנו מוכר בעולם כולו.

אין ספק שזאת תופעה לא רגילה. בדרך כלל כשאנשים, מפורסמים ככל שיהיו, הולכים לעולמם, זכרם נשמר בפנתיאון ההיסטורי של התחומים שבהם הצטיינו, אבל העניין הציבורי בהם וההתלהבות שעוררו נסוגים אל נבכי ההיסטוריה. במקרה של איינשטיין התהליך פועל בכיוון הפוך. ככל שחולף הזמן כן גובר העניין בו. אבני דרך ביצירתו המדעית מצוינות בעולם באירועים פומביים, בכנסים ובימי עיון, בתערוכות ובתוכניות טלוויזיה ובמבול של ספרים חדשים.

איינשטיין היה בראש וראשונה הארכיטקט והמהנדס של הבנה חדשה של העולם הסובב אותנו. ב-1905, המכונה "שנת הפלאות" (Annus Mirabilis), בהיותו פקיד במשרד הפטנטים בעיר ברן שבשווייץ, פרסם ארבעה מאמרים שזעזעו את יסודות הפיזיקה הקלאסית. הוא ערער על הרעיון, שהיה מקובל על כולם, שהאור

מתפשט במרחב כמו גל; הוא סיפק הוכחה משכנעת לקיום הממשי של אטומים בזמן שרוב אנשי המדע האמינו שזהו רק מושג שנוח להשתמש בו במודלים ובחישובים; הוא הניח בסיס להבנה חדשה של המרחב והזמן בתיאוריה הידועה כתורת היחסות הפרטית, והוא הראה שהמסה היא אחת הצורות של האנרגיה. בשנה זו הניח איינשטיין את היסודות לשתי המהפכות הגדולות המאפיינות את הפיזיקה המודרנית: המהפכה של תורת הקוונטים והמהפכה של תורת היחסות. איך הצליח איינשטיין הצעיר, בן ה-26, שלא עבד במוסד מדעי, להגיע להישגים כאלה בנושאים שהיו בחזית המדע, וגדולי המדע של אותם ימים התמודדו אתם?

אחרי שהתברר שאין דרך לכלול את כוח הכבידה של ניוטון במסגרת "תורת היחסות הפרטית" פתח איינשטיין במסע מדעי שאותו השלים כעבור עשר שנים. התוצאה היא "תורת היחסות הכללית", שהיא יצירת המופת שלו. היא המקור לכל מה שאנחנו יודעים היום על היקום – היא הבסיס לקוסמולוגיה המודרנית. כעבור חודשים אחדים פרסם איינשטיין שני מאמרים שכעבור ארבעים שנה עמדו בבסיסה של טכנולוגיית הלייזר.

כל ההישגים האלה, הרעיונות שהובילו אליהם והמסקנות שלהם, כשהם מוצגים בהקשר היסטורי ומדעי רחב יותר, הם נושא הספר שלפנינו. הנושאים האלה נדונו כמובן בספרים רבים, במתכונות שונות וברמות הסבר מגוונות. אחרי הופעת הביוגרפיה המצוינת של וולטר אייזקסון איינשטיין – חייו והיקום שלו ב-2008, כתב אחד ההיסטוריונים של המדע שיש כבר יותר מדי ספרים על איינשטיין, והציע להנהיג מורטוריום בכתיבת ספרים כאלה לתקופה מסוימת. להצעה הזאת לא הייתה שום השפעה. מי שיטרח לעיין באמאזון, למשל, ימצא שמאז נכתבו כשמונים ספרים על היבטים שונים בחייו של איינשטיין ויצירתו.

האם יש אפוא צורך בספר נוסף על איינשטיין? נדמה לי שאנחנו פטורים מלהתמודד עם השאלה הזאת במסגרת "ספריית מנדל לספרים משני עולם". בהקשר כזה אין צורך לחפש צידוקים נוספים לכתיבת

הספר החדש. קשה לחשוב על סדרה כזאת, שלא תהיה בה התייחסות לטקסטים המכוננים של אלברט איינשטיין. בהנחיות למחברים ציינו עורכי הסדרה שמדובר בכתיבה מדעית-פופולרית והפליגו בערכה החינוכי של כתיבה כזאת לחברה הישראלית.

המונח "כתיבה מדעית-פופולרית" דורש התייחסות מסוימת. איינשטיין, בצד היותו מדען גדול, היה גם מיסיונר של המדע. הוא האמין שחוקי הטבע יכולים להיות מנוסחים במספר קטן של עקרונות ושחובתו היא להסביר את העקרונות הללו לקהל הרחב ולהעביר את האושר והסיפוק שהבנתם יכולה להעניק. מיד אחרי השלמת הגרסה הסופית של תורת היחסות הכללית, בנובמבר 1915, התיישב איינשטיין לכתוב סיכום מקיף של התורה לקהילה המדעית. כבר אז הוא חשב שחובתו לכתוב גם ספר פופולרי לציבור הרחב על תורת היחסות הכללית והפרטית גם יחד. לידידו מישל בסו (Besso) הוא כתב: "אם לא אעשה כן, התיאוריה לא תהיה מובנת כפשוטה אף על פי שהיא כזאת, בבסיסה".

איינשטיין ציין בהקדמה הקצרה לאותו ספר (הוא קרא לו ספרון): "המחבר נקט את מרב המאמצים להציג את הרעיונות העיקריים באופן ברור ופשוט ככל האפשר". הוא לא היה מרוצה מן התוצאה: הטקסט היה יבש מדי לדעתו, והוא חשב שמישהו מתאים ממנו היה צריך לכתוב ספר כזה. למרות הביקורת העצמית הזאת, הספר זכה להצלחה עצומה ויצא בעשרות מהדורות ותרגומים, כולל תרגום לעברית כבר ב־1928. זהו מסמך ייחודי בהיסטוריה של הכתיבה המדעית, המאפשר לקורא המתעניין, שאין לו רקע בפיזיקה, לתפוס ולהעריך את גדולתו של אחד ההישגים האינטלקטואליים המתוחכמים ביותר של המוח האנושי, ובכך להעניק לו, כפי שאיינשטיין ניסח זאת: "שעות אחדות של אתגר מהנה".

עם זאת, ספרו של איינשטיין אינו פופולרי במובן המקובל. הוא פופולרי מבחינת הוויתור על פורמליזם מתמטי ומתכונתו, הדיאלוג עם הקורא והדוגמאות מחיי היומיום, אבל הוא אינו מתפשר על קפדנות מדעית, והקוראים מגלים עד מהרה כי נדרש מאמץ אינטלקטואלי

כדי לעקוב אחר זרם המחשבות של איינשטיין וטיעונו. אבל זהו מאמץ ששכרו בצדו. הדברים האלה נכתבו כבר בהקדמה לספר, ויש בהם יותר מרמז לאתגר שלפניו ניצב המחבר.

הספר שלפנינו לא נועד להיות ספר ביוגרפי. מטרתו, כאמור, לתאר את דרכו של איינשטיין במדע. עם זאת, אי אפשר להפריד לחלוטין את הדרך הזאת מחייו הפרטיים ומן היחסים עם משפחתו וחבריו. לכן יש בספר תיאור של פרקים ואפיזודות מחייו הפרטיים, אך רק במידה שהם שופכים אור על החשיבה של איינשטיין כאיש מדע, על החלטותיו והישגיו בתחנות השונות בחייו. כך, למשל, יש בספר פרק על ילדותו ונעוריו, יש בו התייחסות לאשתו הראשונה בתקופת החברות ושנות הנישואים הראשונות שלהם, אבל אין בו התייחסות להירדררות היחסים ביניהם, שהביאו לגירושים מרים. אין בו גם התייחסות לאשתו השנייה אלזה.

הספר מאורגן בארבעה חלקים ובסופו חלק מסכם. החלק הראשון מכיל פרקים מקדימים למפעל חייו המתואר בהמשך הספר. יש בו פרק ביוגרפי על ימי הנעורים, שבהם ניכרים כבר ניצנים של סקרנות לגבי העולם שמסביב ולבטים של אלברט הצעיר בבחירת דרכו ומקומו בעולם הזה. פרק אחר מתאר את עולם הפיזיקה בשלהי המאה התשע-עשרה וראשית המאה העשרים: זו הפיזיקה שהוא למד כסטודנט ואותה הוא עתיד לשנות מן היסוד בתוך זמן קצר. בחלק הזה נקדיש פרק לחייו בברן כפקיד במשרד הפטנטים. יש בו תיאור של היחסים עם חברים קרובים שתרמו להתפתחותו האינטלקטואלית ודיון בעבודתו של איינשטיין ובמאמרים שכתב בשנים אלה. אחד המקורות השופכים אור על התקופה הזאת הם מכתבי האהבה בינו ובין חברתו לספסל הלימודים ואשתו לעתיד מילבה מאריץ', ומהם נצטט.

החלק השני של הספר עוסק ב"שנת הפלאות" של איינשטיין. יש בו פרקים המציגים את המאמרים המכוננים שפרסם בשנה זו. המאמרים של "שנת הפלאות" עוסקים בתחומים ובנושאים שונים, ובכל זאת אין זה מקרה שכולם באו לעולם כמעט בו-זמנית. ביחד

הם מסמלים את המעבר מן הפיזיקה הקלאסית לפיזיקה המודרנית ומביאים את איינשטיין לקדמת הבמה של עולם הפיזיקה.

החלק השלישי של הספר עוסק ביצירת המופת של איינשטיין – תורת היחסות הכללית. הפרק הפותח מסביר מדוע הוא לא הסתפק בתורת היחסות הפרטית, מה הניע אותו לצאת לאודיסאה המדעית לקראת תורת יחסות כללית ומה היו אבני הדרך הראשונות במאמץ הזה. בהמשך נסביר את אחת התובנות הבסיסיות בדרכו של איינשטיין אל תורת היחסות הכללית. מדובר בתפקידה של הגאומטריה בתיאור המרחב והזמן. מתיאור דרכו של איינשטיין אל תורת הכבידה החדשה יתברר מדוע התהליך נמשך זמן רב כל כך: שמונה שנים של דרך חתחתים, של אי-הבנות ושל הנחות מוטעות. פרק מיוחד מוקדש להצלחה של נובמבר 1915, שבה הניח איינשטיין על בימת המדע את הנוסח הסופי של תורת היחסות הכללית ושל הבנה חדשה של תורת הכבידה. פרק נוסף מוקדש למבחנים התצפיתיים של התיאוריה החדשה. יש מבחנים תצפיתיים הקשורים להשפעת הכבידה על האור, ובהם ההתעקמות של קרני האור מכוכבים רחוקים בשדה הכבידה של השמש. כאשר הניבוי הזה אושר בתצפיות אסטרונומיות בעת ליקוי חמה ב־1919, איינשטיין נהפך בן לילה לכוכב עליון, ותהילה זו לא הרפתה ממנו עד סוף ימיו. בפרק הזה נתאר גם את השפעת שדה הכבידה על קצב הזמן ואת הגילוי של שתי תופעות חדשות – חורים שחורים וגלי כבידה – שנובעות מתורת היחסות הכללית, אבל קיומן אושר שנים רבות אחר כך. מיד אחרי שהציג את תורת היחסות הכללית הבין איינשטיין שאפשר ליישם את מסקנות התיאוריה הזאת לתיאור היקום כולו. זאת הייתה לידתה של הקוסמולוגיה המודרנית היחסותית. במשך יותר מעשור הוא דבק בטענה שהיקום הוא סטטי וללא שינוי על אף העדויות המצטברות, עיוניות ותצפיתיות, שהיקום מתפשט. הפרק האחרון בחלק הזה מתאר את ההתפתחות הזאת. אפשר לראות בפרק הזה בחייו המדעיים כבר ביטוי לאותה שמרנות בפעילותו המדעית, שעליה נדבר בחלק הבא של הספר.

החלק הרביעי בספר מתאר את הפעילות המדעית של איינשטיין

במחצית השנייה של חייו. בפרק הזה בחייו אפשר להבחין בגישה שמרנית, שונה מן הלהט המהפכני שאפיין את עבודתו בשנים הקודמות. השמרנות הזאת באה לידי ביטוי בעיקר ביחסו לפרשנות של תורת הקוונטים, שהייתה מקובלת על רוב רובם של עמיתיו, וגם בחיפוש האינטנסיבי והאובססיבי אחר תיאוריה שתאחד את השדה האלקטרומגנטי ושדה הכבידה למסגרת אחת. כפי שנראה, יש קשר בין המטרות שאיינשטיין הציב לעצמו בשניהם. הוא היה אחד ממייסדיה של מהפכת הקוונטים, שחקן מרכזי בשנותיה הראשונות וחלוץ השימושים שלה במחקר ההתנהגות התרמית של חומר ובאינטראקציה בין קרינה לחומר. עם זאת, הוא התנגד לניסוח של תורת הקוונטים שהתגבש במחצית שנות העשרים של המאה העשרים, ובמרכזו הטענה שבעולם המיקרוסקופי תוצאות של מדידות ניתנות רק לחיזוי הסתברותי ושהערך הנמדד של פרמטרים פיזיקליים נקבע על ידי המדידה עצמה ואין לו קיום אובייקטיבי שאינו קשור למדידה. איינשטיין טען עד סוף ימיו שפירוש זה של תורת הקוונטים אינו שלם ושהוא יוחלף בעתיד בפירוש שיחזיר את הסיבתיות לבסיסה של הפיזיקה.

בהקשר זה מוקדש פרק מיוחד למאמר שאיינשטיין פרסם עם שני עמיתים, ובו מתואר ניסוי מחשבתי שנועד להראות שתורת הקוונטים, בפירוש המקובל שלה, אינה שלמה. הדיון סביב המאמר הזה הביא להבנה טובה יותר של תורת הקוונטים ולמושגים חדשים המתארים את אופיה. המאמר הזה הוא הדבר החשוב והמשפיע ביותר, עד היום, מכל מה שאיינשטיין כתב אחרי תורת היחסות הכללית. הפרק השלישי בחלק הזה של הספר מוקדש לחתירתו של איינשטיין לתיאוריה שתאחד במסגרת אחת את כוח הכבידה עם הכוחות החשמליים והמגנטיים. המאמץ הזה משתרע על פני שלושת העשורים האחרונים בחייו, שבהם היטלטל בין תקווה לתסכול, בין התלהבות לאכזבה. הקהילייה הפיזיקלית עסקה באותם ימים בפיתוח אלקטרודינמיקה קוונטית ובשימושים רחבים שלה, אבל איינשטיין נשאר נאמן למטרה למצוא תורת שדה מאוחדת וסיבתית. הוא קיווה

שתורה כזאת תהווה בסיס לפיזיקה כולה, ותהיה חלופה לתורת הקוונטים ההסתברותית.

בחלק המסכם של הספר נסטה שוב מן ההישגים המדעיים של איינשטיין ונתאר את דמותו כמדען-פילוסוף ואת פעילותו מחוץ לעולם הפיזיקה. איינשטיין חשב וכתב לא מעט על מהות המדע, על המחקר המדעי ועל משמעותן של תיאוריות מדעיות. בכתיבה הזאת הוא הציג תפיסת עולם ועקרונות שהנחו אותו בעבודתו המדעית. בחלק זה מוקדש פרק מיוחד לתיאור העקרונות האלה. לצד הדימוי של איינשטיין כאיש מדע מהפכן, יוצר תמונת עולם שלמה וחדשה, עומד פן אחר של חיו ופעילותו. איינשטיין היה נוכח תמיד בעין הציבורית. במאמרים בעיתונות ובהתכתבות עם בני דורו הוא ביטא את דעתו על כל הנושאים שעמדו על סדר היום של האנושות. זה המרכיב ההומניטרי שהתקיים באיינשטיין לצד המרכיב המדעי. הוא מוקדש לעזרה לחלשים ולנרדפים, למאמץ פציפיסטי למנוע מלחמות, להתנגדות לפגיעה בזכויות אדם ולאזהרות מפני עליית המיליטריזם והפשיזם. במרכיב הזה של חיו יש גם ביטוי בולט לפעילות הנובעת מזהותו היהודית. נקדיש לנושא זה פרק מיוחד. ההערות בפרק הסיכום של הספר באות להשלים את התמונה ולשפוך מעט אור על פעילותו של איינשטיין והשפעתו מחוץ לעולם הפיזיקה. הפרק הזה גם מתייחס לשאלה אם הפעילות הזאת היא נספח לעבודתו המדעית או שהיא נעשתה באותו להט ובאותה מחויבות כמו פעילותו המדעית ולכן יש לראות בה חלק אינטגרלי של התופעה הנקראת אלברט איינשטיין.