

## $E = mc^2$ , סיפורה של התגלית הגדולה בהיסטוריה

מאת דייוויד בודאניס, תרגום מאנגלית: יניב פרקש. הוצאת כתר, 296 עמ',<sup>1</sup>

יקיר שושני, מכללת שנקר, רמת-גן

שהולכה בסופו של דבר לחוק שימור המסה, עסק רק יום שבוע, שאותו כינה "יום האושר". גם איינשטיין, כידוע, עבד החל ב-1902 כפקיד פטנטים מדרגה שלישית בברן, ותוך כדי עבודתו זו חיבר כמה מאמרים מדעיים והגה את הרעיונות הבסיסיים של תורת היחסות הפרטית. "העבודה במשרד הפטנטים פטרה אותו מחובת ייצורם הסדרתי של פרסומים אקדמיים (פיתוי לשטחיות) כתב איינשטיין, 'שרק בעלי אופי חזק מסוגלים לעמוד בפניו' ואפשרה לו לעסוק ברעיונותיו ככל שנדרש" (עמ' 81).

היבט מעניין נוסף בסקירה ההיסטורית שבספר הוא תרומתן של נשים להתפתחות הפיסיקה, שלא באה לידי ביטוי הולם במערכת החינוך המדעי. כמה פיסיקאים יודעים, למשל, שססיליה פיין

(Cecilia Payne Gaposchkin) הייתה הראשונה שקראה נכונה את ספקטרום אור השמש, ושעל סמך קריאה זו קבעה שרוב החומר בכוכב זה הוא מימן והליום? בעבודתה זו קראה תיגר על התיאוריה של יבט השמש עשויה מברזל, תיאוריה שלא היה בכוחה להסביר את מקור האנרגיה של השמש. למסקנותיה של ססיליה פיין הייתה חשיבות מכרעת להבנת מקור האנרגיה של השמש ושל כוכבים אחרים. היום אנו יודעים בבירור שבכוכבים מתרחשים תהליכי היתוך (fusion) של גרעינים קלים לכבדים יותר, למשל היתוך של מימן להליום, או של הליום לפחמן, והפחת במסה בין המגיבים של תגובה זו לבין תוצריה הופך לאנרגיה.

תרומה חשובה לא פחות הייתה של הפיסיקאית היהודיה ליוזא מייטנר, שב-1938 הציעה לאוטו האן את הניתוח התיאורטי הנכון של ביקוע גרעין האורניום, אף על פי שהאן בגד בידידותם ודאג לסלקה מהמכון הגרמני שבו עבדה עם עליית היטלר לשלטון. מאתיים שנה קודם לכן הציעה החוקרת אמלי די שאטלה הסבר לכך שהאנרגיה הקינטית מתכונתית לריבוע המהירות, כפי שסבר לייבניץ במאה ה-17, ולא כפי שסבר בן דורו אייזיק ניוטון, שאנרגיה זו מתכונתית למהירות בחזקה הראשונה.

ליבתו של הספר (חלקים 3-5) עוסקת במשמעויות הנוסחה המפורסמת ובתוצאות הנגזרות ממנה. המחבר מתאר בהרחבה את הבעיות שעמדו לפני הגרמנים בפיתוח הפצצה הגרעינית במלחמת העולם השנייה, ואיך הצליחו האמריקאים

אם שירים מודרניים קצרים, הטומנים בחובם רעיון המבוטא בתמציתיות, יכולים להידמות לנוסחאות בפיסיקה, כפי שנדמה לי לפעמים, הרי שהנוסחה  $E = mc^2$ , שפיתח אלברט איינשטיין בתורת היחסות הפרטית שלו ב-1905, יכולה להיחשב כשיר (הלל) לאנרגיה.

דייוויד בודאניס, המחבר, קיבל הכשרה בסיסית במדעים, אך העדיף לעבוד כעיתונאי וכיועץ כלכלי, ובספר שלפנינו הוא מתאר בלשון קולחת ומרתקת את מרכיביה של אחת הנוסחאות החשובות בפיסיקה המודרנית.

עד תחילת המאה העשרים היו ידועים שני חוקי שימור נפרדים למסה ולאנרגיה. בכל תהליך פיסיקלי או כימי המתרחש במערכת סגורה, כמותם של גדלים אלה אינה משתנה. היה זה איינשטיין שהצביע בראשונה, מתוך שיקולים תיאורטיים גרידא, שמסה יכולה להפוך לאנרגיה ולהפך - אנרגיה של קרינה אלקטרומגנטית, יכולה להפוך לשני חלקיקים בעלי מסה הפורשים זה מזה בתהליך הידוע כיום כ"יצירת זוגות" (pair production). מכיוון שהספר מיועד לקהל לא מקצועי, אין המחבר מציע הוכחה או הסבר למקורה של הנוסחה המקשרת (הסבר פשטני מובא באתר האינטרנט של המחבר).

שני חלקיו הראשונים של הספר סוקרים בפירוט כל אחד מהגדלים הפיסיקליים והסמלים המופיעים בנוסחה, תוך כדי התמקדות באישים הקשורים בהתפתחותם. מסקירה מעניינת זו אנו למדים שאישים שלא מתוך הממסד המדעי תרמו תרומות נכבדות לפיסיקה. בפרק על הבהרת מושג האנרגיה (עמ' 21 ואילך) מתאר המחבר את תרומתו של מייקל פרדיי, שוליה בכריכיית ספרים בלונדון של תחילת המאה ה-19, שבשל אהבתו הרבה לספרים הגיע לתובנות עמוקות הקשורות למושגי האנרגיה והשדה החשמלי. המחבר מסביר את יכולתו של איש ללא השכלה פורמלית לתרום תרומה חשובה כל כך להתפתחות הפיסיקה בכך ש"בדיעבד התברר שהשכלתו הפורמלית המוגבלת של פרדיי הייתה יתרון. אין זה מקרה שכיח; כשנושא מחקר הוא בשלבים מתקדמים... הדלתות ננעלות, המאמרים נעשים בלתי קריאים. אך בימים הראשונים הללו של הבנת מושג האנרגיה היו הדברים שונים" (עמ' 24). בפרק הסוקר את מושג המסה מובא סיפורו של אנטואן לבואזייה, שהיה במשך 20 שנה רואה חשבון, ובחקירתו,

המתעניין בפיסיקה המודרנית, ימצאו בו עניין מסוים גם אנשי מקצוע בתחום ההיסטוריה של הפיסיקה. המחבר השקיע מאמץ ניכר בליקוט מגוון רחב של מראי מקום, בהרחבה של נושאים מגוון הספר בהערות מאלפות, ובהארות היסטוריות ופילוסופיות מרתקות. כך, למשל, הוא מביא את המחלוקת בין ניוטון ללייבניץ בקשר לתלות אנרגיית התנועה במהירות ומקשר זאת עם קיומו של האל. כידוע, ניוטון היה חדור אמונה דתית והאמין בתכנון האלוהי של העולם וחוקיו. יתרה מזאת, הוא סבר שאלוהים מספק באופן רציף אנרגיה לעולם. ואכן, לדעתו, אם אנרגיית התנועה מתכונתית למהירות בחזקה הראשונה, הרי בהתנגשות של שני גופים שמהירויותיהם מנוגדות כל אנרגיית התנועה שלהם הולכת לאיבוד, ועל כן יש צורך בחידוש רציף של מלאי האנרגיה בעולם. הספר מכיל דוגמאות נוספות רבות בעלות הקשרים פילוסופיים והיסטוריים מעררי מחשבה.

בודאניס מסיים את ספרו במשפט: "נהניתי מאוד לכתוב את הספר הזה" (עמ' 284), ועל כן אין לי אלא להוסיף: תודה לך מר בודאניס, נהניתי מאוד לקרוא את הספר הזה.

1. Bodanis, D., *E = mc<sup>2</sup>: The World's Most Famous Equation*. New York, Walker, 2000.

### הכרת תודה

אנו מודים לפרופסור יקיר שושני ולמיכאל הנדלזלץ עורך מדור "ספרים" ב"הארץ" על הרשות שנתנו לנו לפרסם כתבה זו ב"תהודה"; כתבה זו נלקחה מהמדור "ספרים" ב"הארץ" מיום 7.8.02.

תהודה

להתגבר עליהן ב"תוכנית מנהטן" שלהם. חבל שהמחבר לא ייחד אותה מידה של תשומת לב לתיאור שימושי הנוסחה לרווחת האדם והחברה, הגם שיש בספר תיאור, לדעתי קצר מדי, של כמה שימושים מעניינים כאלה. להערכתך, ניתן היה להרחיב יותר גם בדיון בחשיבותה של הנוסחה בהבנת התהליכים התרמו-גרעיניים המספקים את האנרגיה של הכוכבים, ובכללם השמש שלנו, ותרומתה בפיתוח מודלים באסטרופיסיקה, כגון יצירת חורים שחורים והתפתחות היקום עד קץ הדורות. מניסיוני אני יודע שנושאים אלה מרתקים מאוד אנשים רבים. אני סבור שטוב היה להביא, אם לא בגוף הספר כי אז בהערות, דוגמה אחת לפחות של תהליך היתוך, למשל של דוטריום וטריטיום להליום, ולהראות, באמצעות שימוש פשוט למדי בנוסחה, מהי האנרגיה המשתחררת מהיתוך ביניהם.

במקומות אחדים התיאורים שמציע המחבר לוקים באי-דיוקים, אולי בגלל הקושי להסביר תהליכים פיסיקליים מורכבים לקהל הרחב. כזה הוא, למשל, תיאור רעיונותיו של צ'נדרסקהאר (Chandrasekhar) בקשר להיווצרותם של חורים שחורים (עמ' 172 ואילך) או הטיעון בעמ' 53 המנסה להצדיק את הגידול במסה של מעבורת חלל שמהירותה מתקרבת למהירות האור (הסבר משכנע יותר מובא בהערות בעמ' 215). גם בדיון על כוח המשיכה של כדור הארץ בעמ' 217 יש אי-דיוק במשפט: "תפוח, או כל עצם אחר, נופל בשנייה אחת כ-5 מטרים". כידוע, על פני כדור הארץ יש תאוצה (כ-10 מ' לשנייה בריבוע), כך שרק בשנייה הראשונה נופל הגוף כ-5 מטרים ולאחר מכן מהירותו גדלה והולכת.

הגם שהספר פופולרי באופיו ומיועד לקהל קוראים רחב

אנו מצרים על מותו הפתאומי של **פרופסור מנחם פיינגולד** ומשתתפים באבל נורית והמשפחה. פרופסור פיינגולד כיהן שנים רבות כראש המחלקה להוראת הטכנולוגיה והמדעים בטכניון והיה ממעצבי הוראת הפיסיקה בארץ. היה חבר בועדת המקצוע להוראת הפיסיקה החל מהקמתה בשנת תשמ"ב ועמד בראשה בשנים תשנ"ד - תשנ"ו.

יזם והוביל את נושא הוראת הפיסיקה בחינוך הטכנולוגי. ועמד בראש פרויקט הפיסיקה של מערכות טכנולוגיות החל מראשיתו.

מן היוזמים והמובילים של אולימפיאדת הפיסיקה הארצית לנוער; צרף את ישראל לאולימפיאדה הבינלאומית.

### יהא זכרו ברוך.

המחלקה להוראת המדעים במכון ויצמן למדע  
והפיקוח על הוראת הפיסיקה