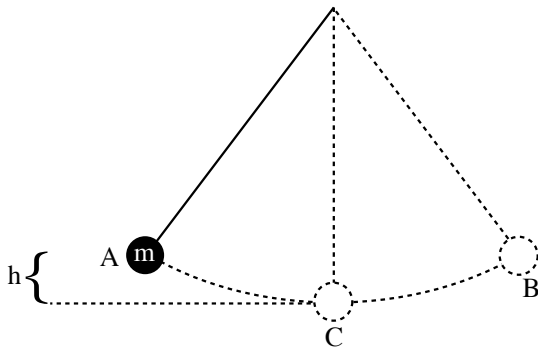




העשרה

$E=MC^2$ הבעיה הבוערת של דורנו¹

אלברט איינשטיין



¹ כדי להבין את השקילות בין מסה ואנרגיה עלינו להיזכר בשני עקרונות שימור או "שקילות", אשר באופן עצמאי זה מזה תפסו במשך תקופה ארוכה מקום חשוב בפיסיקה הטרומ יחסותית. העקרונות הנידונים הם עקרון שימור האנרגיה ועקרון שימור המסה. עקרון שימור האנרגיה שהחל לקרום עור וגידים עוד במאה ה 17 בעבודותיו של לייבניץ התפתח במאה ה 19 לרעיון המשתמע במהותו מאחד מעקרונות המכניקה.

² חישבו למשל על מטוטלת, מסה m התלויה על חוט ומתנדנדת קדימה ואחורה בין הנקודות A ו-B. בנקודות A ו-B המסה נמצאת במקום גבוה בשיעור h מאשר מקומה בנקודה C - הנקודה הנמוכה

ביותר במסלול (ראו ציור). בנקודה C לעומת זאת הגובה אליו הרמנו את המסה נעלם ובמקומו יש למסה מהירות v . נראה כאילו הגובה אליו הרמנו את המסה ניתן להמרה מלאה למהירות ולהיפך. הקשר המדוייק בין הגובה המקסימאלי למהירות המקסימאלית ניתן ע"י הביטוי: $\frac{1}{2}mv_{max}^2 = mgh_{max}$, כאשר g מסמלת את תאוצת הנפילה החופשית. מעניין שקשר זה אינו תלוי באורך המטוטלת או בצורת המסלול שלאורכו נעה המסה.

³ הדבר המהותי הוא שישנו גודל שנשאר קבוע לאורך כל התהליך - האנרגיה. בנקודות A ו-B זוהי אנרגיה של מקום, או אנרגיה "פוטנציאלית", ובנקודה C זוהי אנרגיה של תנועה, או אנרגיה "קינטית". אם רעיון זה נכון, אזי סכום האנרגיות הללו (קינטית ופוטנציאלית): $\frac{1}{2}mv^2 + mgh$ חייב להיות קבוע בכל מקום לאורך המסלול של המטוטלת, כאשר h מייצגת את גובה המסה מעל הנקודה C במקום מסויים לאורך מסלול המטוטלת, ו- v מייצגת את המהירות של המסה בנקודה זו. אכן, נמצא שקשר זה נכון במקרה של המטוטלת. הכללה של קשר זה למקרים נוספים נותנת לנו את עקרון שימור האנרגיה המכאנית. אך מה קורה כשיש חיכוך שעוצר את תנועת המטוטלת?

⁴ התשובה לשאלה זו נמצאה במחקר של תופעת החום. מחקר זה התבסס על ההנחה שחום הוא ישות שאינה ניתנת להריסה שזרמת בשלמות מאובייקטים חמים לאובייקטים קרים. המחקר הציע לכאורה את קיומו של "עקרון שימור החום". מצד שני, עוד מקדמא דנן ידוע שניתן להפיק חום מחיכוך, למשל שיטות הדלקת האש של האינדיאנים. לאורך תקופה ארוכה פיסיקאים לא הצליחו להסביר תהליכים כאלה ואחרים של "יצירת" חום. קושי זה נפתר רק לאחר שנמצא שכל כמות של חום המיוצרת ע"י חיכוך מלווה בהפסד של כמות זהה של אנרגיה. כך הגיעו הפיסיקאים לעקרון ה"שקילות בין חום ועבודה". במקרה של המטוטלת שלנו למשל, אנרגיה מכאנית מומרת בהדרגה ע"י עבודת החיכוך לחום.

Einstein, A. (1946). $E=mc^2$: The most urgent problem of our time. Science Illustrated, 1(1), 16-17 | 1

כתב-יד המקורי, שנכתב בשפה הגרמנית, נמצא בארכיון אלברט איינשטיין, באוניברסיטה העברית, וזכויות היוצרים בבעלות האוניברסיטה. תרגום חופשי מאנגלית: שולמית קפון. המאמר תורגם והפסקות מוספרו לצורך הפעילות המתוארת בעמודים 26-31 בחוברת זו.

⁵ באופן דומה עקרונות שימור האנרגיה המכאנית והאנרגיה התרמית התמזגו לעקרון שימור אחד. לאחר מכן הפיסיקאים שוכנעו שעקרון השימור הנ"ל ניתן להכללה גם לתהליכים כימיים ואלקטרומגנטיים - ולמעשה ניתן לשימוש בכל תחום. הסתבר שהסכום של כל האנרגיות במערכת פיסיקאלית נשאר קבוע בכל שינוי אפשרי אותו עוברת המערכת.

⁶ הבה נתבונן כעת בעקרון שימור המסה. מסתו של גוף מוגדרת כהתנגדותו של הגוף לתאוצה (מסה אינרטיית). מסה נמדדת גם ע"י משקל הגוף (מסת כבידה). העובדה ששתי הגדוהות השונות זו מזו באופן רדיקאלי מובילות לאותו ערך של מסה היא עובדה מדהימה כשלעצמה. בהתאם לעקרון האומר שמסות לא משתנות תחת שינויים פיסיקאליים או כימיים, המסה נתפסה כתכונה מהותית של החומר בהיותה גדל שאינו משתנה. חימום, המסה, אידוי, או איחוד בתרכובות כימיות לא משנים את המסה הכוללת של החומר.

⁷ הפיסיקאים קיבלו את העקרון הנ"ל כעקרון נכון עד לפני כמה עשרות שנים. תורת היחסות הפרטית הצביעה על כך שעקרון זה אינו מדויק, לכן, עקרון זה מוזג אל תוך עקרון שימור האנרגיה - באותו אופן שכשישים שנים קודם לכן עקרון שימור האנרגיה המכאנית צורף לעקרון שימור החום. נוכל לומר שעקרון שימור האנרגיה שקודם לכן בלע את עקרון שימור החום, המשיך ובלע גם את עקרון שימור המסה - ומכסה למעשה את כל תחומי הפיסיקה לבדו.

⁸ נהוג לבטא את השקילות בין מסה ואנרגיה (בצורה לא לגמרי מדויקת) ע"י הנוסחה $E = mc^2$, כאשר c מייצגת את מהירות האור השווה בקירוב ל $300,000$ ק"מ לשניה, E היא האנרגיה האגורה בגוף הנמצא במנוחה ו- m היא מסתו של הגוף. האנרגיה שיש למסה m היא המכפלה של מסה זו בריבוע המהירות העצומה של האור - כלומר כמות אדירה של אנרגיה לכל יחידת מסה.

⁹ אם כל גרם מסה מכיל בחובו כמות כל כך גדולה של אנרגיה, מדוע לא הבחינו בכך כל כך הרבה שנים? התשובה פשוטה: כל עוד ארגיה זו אינה נפלטת החוצה אי אפשר לצפות בה. למה הדבר דומה? חישוב על אדם עשיר שלא מבזבז פרטה - איש לא יוכל לדעת עד כמה הוא עשיר.

¹⁰ הבה ננסה להסתכל כעת על התהליך ההפוך: תוספת E לאנרגיה צריכה להיות מלווה בגידול של $\frac{E}{c^2}$ במסה. נוכל בקלות לספק אנרגיה למסה, למשל אם נחמם אותה ונעלה את הטמפרטורה שלה ב 10 מעלות. מדוע איננו מודדים גידול במסה או במשקל בתהליך כזה? הבעיה היא שבביטוי לגידול במסה תוספת האנרגיה מחולקת בגודל העצום c^2 (ריבוע מהירות האור). לכן במקרה זה הגידול במסה הוא כל כך קטן שאי אפשר למדוד אותו באופן ישיר אפילו ע"י מאזניים רגישים ביותר.

¹¹ על מנת שהגידול במסה יהיה מדיד, השינוי באנרגיה ליחידת מסה צריך להיות עצום. ידוע לנו רק על תהליך אחד בו משתחררת כמות גדולה כל כך של אנרגיה ליחידת מסה - ביקוע גרעיני. באופן סכמטי התהליך מתרחש כדלהלן: אטום בעל מסה m מתפרק לשני אטומים בעלי מסה m' ו- m'' שנפרדים עם אנרגיה קינטית מאד גדולה. נדמין את שתי המסות הללו (m' ו- m'') במנוחה, כלומר ניקח מהן את האנרגיה הקינטית שלהן. במצב זה האנרגיה שלהן קטנה מהאנרגיה של המסה m לפני הביקוע על פי עקרון השקילות של המסה והאנרגיה, סכום המסות של תוצרי הביקוע m' ו- m'' צריך להיות קטן ממסת האטום היוצר m , וזאת בסתירה מוחלטת לעקרון שימור המסה. ההבדל היחסי בין מסת האטום היוצר לסכום המסות של התוצרים הוא מסדר גודל של עשירית האחוז.

¹¹ איננו יכולים לשקול באופן ישיר אטומים בודדים, אבל ישנן דרכים לא ישירות למדוד את המשקל שלהם בצורה מדויקת. באותו אופן ניתן גם לקבוע את האנרגיה הקינטית שמועברת לתוצרי הביקוע m' ו- m'' . לפיכך, התנאים למדידה ולאישור הנוסחה לשקילות המסה והאנרגיה קיימים היום. עקרון השקילות בין המסה והאנרגיה מאפשר לנו לחשב מראש, בהסתמך על המשקל הידוע של אטומים, כמה אנרגיה תשחרר בכל תהליך ביקוע גרעיני אותו נעלה בדעתנו. יחד עם זאת, העקרון אינו אומר לנו בשום צורה שהיא כיצד, מתי ואם בכלל ביקוע גרעיני שכזה יוכל לצאת לפועל.

¹² נמחיש את התהליך בעזרתו של מיודענו האיש העשיר. האטום m הוא אותו קמצן בסיפורנו, שבמהלך חייו לא נידב אפילו פרטה מעושה העצום והרב. בצואתו הוא מוריש את כספו (אנרגיה) לשני בניו m' ו- m'' בתנאי שהם יתרמו לקהילה סכום פעוט באופן יחסי, פחות מאלפית משווי הירושה (אנרגיה או מסה). לבנים נשאר מעט פחות מאשר היה לאב (סכום המסות של התוצרים m' ו- m'' קטן ממסת האטום היוצר m). למרות שהחלק שנתרם לקהילה קטן מאד באופן יחסי לכל הירושה, חלק זה (למשל, אנרגיה קינטית) גדול מאד באופן אבסולוטי ונושא בכניפו איום נורא. מניעת האיום הזה הפכה לבעיה הדחופה ביותר בתקופתנו.