

250 מדענים התכנסו וקיבלו החלטה דרמטית לגבי משקלו של הקילוגרם

החפץ שמופיע בתמונה, תחת שלוש שכבות זכוכית, הוא גליל העשוי פלטינה ואירידיום שעל פיו נמדד הקילוגרם. בעקבות כינוס היסטורי שנערך לאחרונה בוורסאי, הקילוגרם צפוי לצאת לגמלאות

נטע אחיטוב 31.12.2014 14:08

250 מדענים מ-20 מדינות הגיעו לכינוס הכללי על מידות ומשקלות, שהתקיים בנובמבר בוורסאי שבצרפת. בכינוס, שנמשך יומיים, התקבלו חמש החלטות. ארבע מהן נוגעות לנהלים ולביורוקרטיה מדעית. ההחלטה החמישית עומדת לשנות את פני המדע כפי שאנו מכירים אותו, לנצח: בשנת 2018 יוגדר הקילוגרם מחדש.

בשביל להבין מה זה אומר, עלינו להתוודע אל הקילוגרם. לא סתם קילוגרם, אלא הקילוגרם, שהוא גליל העשוי פלטינה ואירידיום, השוק בעיירה סברה (Sèvres) שליד פריז. תום וויפל, כתב המדע של "טיימס" הלונדוני, זכה לבקר לאחרונה את הקילוגרם, ובמאמר שפרסם במגזין "Intelligent Life", סיפר כי הוא מאוחסן מתחת למעבדות הלשכה הבינלאומית למידות ומשקלות (BIPM) בתוך כספת תת קרקעית, מאחורי דלת פלדה, שכדי לפתוח אותה נדרשים שלושה מפתחות — רק שניים מהם נמצאים בצרפת — בתוך קופסה שדופנתיה מורכבת משלוש שכבות זכוכית. אנשים מעטים ראו את הקילוגרם ומעטים אף יותר הורשו לגעת בו ב-125 שנות קיומו כמסה החשובה בעולם, שעל פיה מכילים את כל המסות האחרות.

הקילוגרם נוצר ב-1889, בעקבות החלטה שהתקבלה בכינוס הכללי הראשון על מידות ומשקלות (הכינוס מתקיים אחת לארבע או שש שנים). אלה היו שלהי עידן הנאורות ולמדענים כבר היה בחר שאם הם חצים לקדם את המדע, עליהם להתבסס גם על הישגיהם של מדענים ממוקמות ומזמנים אחרים. כדי לעשות זאת נדרשו יחידות מידה אחידות המוסכמות על כולם. לאחר דיונים ארוכים, שנפרשו על פני יותר ממאה שנה, התכנסו לבסוף נציגי המדינות והגדירו את יחידות המפתח של המדע. זוהי מערכת היחידות הבינלאומיות (SI — *Système international d'unités*): מטר עבור מרחק, שנייה עבור זמן, אמפר עבור זרם חשמלי, קלווין עבור טמפרטורה, מול עבור כמות חומר, קנדלה עבור עוצמת אור וקילוגרם עבור מסה של חומר. BIPM אחראית על ההגדרה של היחידות האלה, אבני היסוד של המדע הגלובלי, על הפצת המידע ועל ההאחדה הכלל עולמית שלהן.

מערכת היחידות נוצרה בסוף המאה ה-19, אבל הרעיון החל לצוף כבר בסמוך למהפכה הצרפתית, בסוף המאה ה-18. הצרפתים המהפכנים ראו את עצמם כמופת של נאורות וביקשו להוביל את העולם בדרכם. לצורך כך נדרשו מונחים משותפים, וכך יצא שהם היו הראשונים להגדיר באופן בינלאומי מסה ואורך. הגרם (ומתוכו הקילוגרם) הוגדר "המשקל המוחלט של נפח מימ טהורים השווים לקובייה של 1/100 ממטר ובטמפרטורה של קרח נמס". לא בחר? זאת בדיוק הבעיה. הצרפתים רצו להגדיר את

הקילוגרם כמסה של ליטר אחד של מים, אבל מים הם לא דבר יציב שאפשר לבסס עליו הגדרה. לכן ההגדרה הסתבכה. המטר הוגדר "1/10,000,000 המרחק של קשת כדה"א". עם ההגדרה הזאת היתה בעיה אחרת — קשה לכייל עצמים על פי אמת מידה כללית כזאת.

לכן ב-1889 הוחלט ליצור את האחידות הרצויה ביחידות המידה באמצעות עצמים גשמיים, שעל פיהם יטילו כל הדברים האחרים. התכשיטן הראשי של בית המלוכה הצרפתי הוחזר למולדת מגלותו הכפויה, כדי ליצוק פרוטוטיפים פיזיים שיגדירו קילוגרם ומטר. העצמים שיצר התכשיטן המלכותי שימשו את המדע העולמי כיחידות מידה במשך 90 שנה, עד שהוחלפו בעצמים חדשים המורכבים מחומרים מתקדמים יותר. אלו הם המטר והקילוגרם המוכר לנו עד היום.

ההגדרה של מטר הוחלפה מעצם פיזי למשוואה כבר ב-1960 ("1.65 מיליון פעמים אורך הגל של אור הנצח על ידי מעבר בקריפטון", ומאוחר יותר, בעקבות התפתחויות מדעיות וטכנולוגיות, "המרחק שעובר האור בריק במשך זמן של 1/299,792,458 שנייה"). אך הקילוגרם (שמו הרשמי הוא — *PIK* — *Prototype International du Kilogramme*) נותר לשרת את המדע עד היום ויוחלף למשוואה רק ב-2018. במשך השנים יצרו המדענים של *BIPM* כמאה גלילי-בת של הקילוגרם, שנשלחו למקומות שונים בכל קצות תבל כדי לשמש את המדע המקומי כאמת מידה. שישה מגלילי-הבת הללו נותרו בצרפת, בחדר הסמוך לכספת השמורה של הקילוגרם. תפקידם לשמש כביקורת לקילוגרם. אחת לכמה עשורים נשלחים גלילי-הבת של הקילוגרם מרחבי העולם לצרפת, מלווים על ידי מדען בכיר ממדינת המוצא שלהם, כדי לכייל אותם באופן מבוקר במשרדי *BIPM* על סמך הקילוגרם. לאחר כמה שבועות גלילי-הבת שבים לביתם וממשיכים לשרת את המדענים המקומיים. השקילות האחרונות של גלילי-הבת במעבדות *BIPM* נערכות בשנתיים האחרונות, ומה שהתגלה בהן מדיר שינה מעיני המדענים. הגילוי זירז את ההחלטה להגדיר מחדש את הקילוגרם.

התברר שבהשוואה לגלילי-הבת, כולל אלו השוכנים בצרפת באותם תנאים, גלילי-האב — הקילוגרם — העלה במשקלו. בסך הכל מדובר ב-60 מיקרוגרם שנוספו לו בהשוואה לצאצאיו, מסה שהיא קטנה פי מאה מזו של נמלה קטנה — מה שאומר שאם נמלה היתה מטיילת על הקילוגרם, ההפרש במסה היה פי מאה מזה שנוסף לו בשקילות האחרונות, דימי שהעניק וויפל. "הקילוגרם הוסיף רק 0.000006% למשקלו המקורי, אבל אם יש עצם בעולם שאסור שזה יקרה לו, זהו הקילוגרם", הוא כותב. הסיבות לשינוי המיקרוסקופי של הקילוגרם לא ברורות לאשורן, אבל יש כמה סברות. אחת מהן גורסת שגז הכלוא בתוך הגליל משתחרר לו אט אט בחלוף עשורים. לפי תיאוריה אחרת, מקובלת יותר, הקילוגרם ספג לתוכו חלק מהחומרים שבאמצעותם ניקו אותו.

כדי להבין את המשמעות מרחיקת הלכת של השתנות הקילוגרם, אפשר לבצע תרגיל היפותטי. אם מחליטים לחצות את גליל הקילוגרם לשניים, כל שאר הדברים בעולם יהיו בעלי מסה כפולה מבעבר. אם יש בידכם לבנה השוקלת קילוגרם אחד ולפתע הוחלט לחצות את הקילוגרם לשניים, על פי אמת המידה החדשה של הקילוגרם, הלבנה שבידכם שוקלת עכשיו באופן רשמי שני קילוגרמים.

הקילוגרם המתמשש

העריצות של גליל הקילוגרם הובילה את וויפל לכתוב עליו ב"Intelligent Life" כי "הוא כמו דון של מאפיה בעת בריחה. באמצעות הסגנים שלו, גלילי-הבת, הוא מצליח לשמר את ההגמוניה הקשוחה שלו על המשקלות והמידות של העולם". לפי וויפל, "בשביל עצם שמבלה את מרבית זמנו נסתר מהעין, לקילוגרם יש נכחות כריזמטית מוזרה".

השינוי שעובר על הקילוגרם אמנם זירז את תהליך ההגדרה המחודשת של הקילוגרם, אבל לא התחיל

אותו. למעשה, התהליך החל כבר בשנות ה-70. "הטכנולוגיה המודרנית הופכת את ההגדרה המחודשת לאפשרית, אבל כדי להשיג את הדיוק המתבקש נדרשו הרבה שנים של מאמץ", מסביר בראיון ל"הארץ" ד"ר ריצ'רד דיוויס, מנהל המחקר הפיזיקלי לשעבר ב-BIPM, שיצא לפנסיה לא מזמן. ואכן, נראה שעתה הגיעה השעה שמשוואה פיזיקלית תתפוס את מקום הכבוד בהגדרת המסה ותוציא גם את הקילוגרם לגמלאות. לא עוד עצם חדני, שעל פיו יישק דבר, אלא חישוב אוניברסלי המבוסס על קבועים טבעיים וזמינים לכל.

"ההגדרה המחודשת של הקילוגרם חייבת להיות כזו שאפשר ליישם בפועל בכל מקום ובכל זמן בעולם, תוך שימוש בכמה דרכים שונות", מסביר דיוויס. "אנחנו מתייחסים להגדרה החדשה של הקילוגרם כ'מימוש' הקילוגרם. זאת אומרת, שבאמצעות ניסוי מדעי יהיה אפשר לממש אותו קילוגרם בכל מקום ובכל זמן".

"כדי להמחיש את ההבדל בין משוואה לבין עצם פיזי שמגדיר מסה, דמייני שאת מנסה לתקשר עם ציוויליזציה אחרת", אומר פרופ' מוטי מילגרם מהמחלקה לפיזיקה של חלקיקים ואסטרופיזיקה במכון ויצמן. "נניח שאת מעוניינת להגיד לאנשי הציוויליזציה הזאת שעצם מסוים שוקל שלושה קילוגרמים. אם גליל פלטינה ואירידיום הוא ההגדרה שלך, את צריכה לתת להם אותו כדי שיוכלו לתאר לעצמם מהו קילוגרם ומכאן מהם שני קילוגרמים. אבל אם קיימת הגדרה המבוססת על חוקי הטבע בלבד, כל מה שאת צריכה לתת להם הן הוראות לביצוע הניסוי, מתכן לביצוע במעבדה שלהם. יש בזה יתרון גדול". שני קבועים התחרו על הזכות להגדיר את הקילוגרם. קבוע פלאנק, האלמנט החשוב ביותר בפיזיקה הקוואנטית, ומספר אבוגדרו, המתאר את מספר החלקיקים הנמצאים במול של חומר מסוים. בכינוס בנובמבר הוחלט שקבוע פלאנק יהיה הבסיס להגדרה. מביתו בפרזי מסביר דיוויס את ההחלטה בהתכתבות מקוונת: "הבחירה בקבוע פלאנק טובה כמו כל בחירה אחרת, אבל היא מסתמנת כשימושית יותר לצורך דיוק של מדידות אלקטרוניות ולפיזיקה הקוואנטית".

מה שעומד להתרחש בשנים הקרובות בעקבות ההחלטה להגדיר את הקילוגרם מחדש הוא תהליך מרתק בפני עצמו. כדי שהמשוואה המגדירה קילוגרם תיכנס לתוקף ב-2018, עליה להתממש עד אז באופן משביע רצון (כלומר התוצאה היא מסה השווה קילוגרם בדיוק) בשלוש מעבדות שונות לפחות, תוך שימוש בשתי שיטות שונות לפחות ועם קונסנזוס שהמימוש אכן הצליח. קיימות כבר שתי שיטות שונות בעלות דיוק גבוה למימוש המשוואה. האחת נקראת "איזון וואט" (Balance de Watt), וכפי שמסביר דיוויס, היא משתמשת באיזון של אלקטרונים כדי למדוד מסה של עצמים ומגיעה מעולמה של הפיזיקה הקוואנטית, כך שהיא מכילה באופן טבעי את קבוע פלאנק. הדרך הנוספת מבוססת על ספירת אטומים בקילוגרם אחד של סיליקון והיא מבוססת על כמה טכנולוגיות מדעיות שונות. גם בה מופיע קבוע פלאנק. "שתי השיטות שונות זו מזו, אבל מובילות לאותה תוצאה — מה שאומר שיש סיכוי טוב למימוש ההחלטה בשנת 2018", מסביר דיוויס.

כיצד תשפיע ההגדרה המחודשת של הקילוגרם על המדע ועל הציבור הרחב? על פי דיוויס, היא לא תשפיע: "בחי היומיום שלם, ההגדרה החדשה של הקילוגרם תהיה שקופה לחלוטין. בשביל חבנו, קילוגרם עדיין ייצג פחות או יותר את המסה של ליטר אחד של מים, כפי שהיה מאז 1799. אבל מצד שני, מדידות מדויקות מאוד של מסה ירוויחו מההגדרה המחודשת של הקילוגרם, כי ביסוס היחידה של מסה על קבוע פיזיקלי פירושו שהיחידה לא תשתנה עם הזמן".

דיוויס עבד עם גליל הקילוגרם וטיפל בו במשך קרוב ל-50 שנה. על השאלה אם לא יתגעגע אל הקילוגרם לאחר שיוחלף במשוואה הוא עונה באופן לא צפוי: "אנשים מופתעים לגלות שאני דווקא מאוד

נלהב מההגדרה המחודשת של הקילוגרם ונפעם מההישגים האדירים שהביאו אותנו לפתחה. אני מעריך את העבודה העצומה שהמדענים עשו במאה ה-19, היא שירתה אותנו היטב, אבל כשמגיע משהו טוב יותר צריך להשתמש בו. האמת היא שגם BIPM כמוסד נלהב מההגדרה המחודשת של הקילוגרם, אף על פי שזה אומר שאחד התפקידים שלנו, שומרי הקילוגרם מאז 1889, עומד להשתנות. אבל זה המדע — הוא משתנה כל הזמן".