

אל תזדעזעו מטעויות*

תרגום של המאמר: Don't bristle at blunders מאת מריו ליביו שפורסם בכתב העת Nature



מריו ליביו

במאמר שפורסם בגיליון מיוני 1991 של *Nature*, פרסמו האסטרונומים אנדרו ליין (Lyne), מתיו ביילס (Bailes) וסטנאם שמאר (Shemar) הודעה מחשמלת: גילוי של כוכב לכת ראשון מחוץ למערכת השמש שלנו. להפתעת כולם, מסלולו של כוכב זה לא הקיף כוכב דמוי שמש, אלא פולסר - הצאצא הנויטרוני הצפוף של פיצוץ סופרנובה. שינוי המחזור של הבזקי קרינה א"מ בתדרי רדיו שנפלטו מהפולסר הסגיר את דבר קיומו של כוכב הלכת המדובר. לרוע המזל, ליין וביילס נאלצו לחזור בהם כמה חודשים מאוחר יותר מהודעתם בחושפם שגיאיה עליה דיווחו ב-Nature בינואר 1992 [2]. האסטרונומים הודיעו באומץ כי הם לא תיקנו את חישוביהם כראוי עבור תנועתו של כדור הארץ סביב השמש. חשיפת הטעות על-ידי ליין בפגישה של האגודה האסטרונומית האמריקנית באותו חודש זכתה אותו בתשואות. אבל לסיפור היה סוף טוב יותר.

מיד לאחר ההצגה של ליין, הודיע האסטרונום אלכסנדר וולשצ'אן (Wolszczan) שהוא ועמיתו דייל פרייל (Frail) גילו באותה טכניקה שני כוכבי לכת המקיפים פולסר אחר. אלה, כך התברר, היו אכן הגילויים הראשונים של כוכבי לכת מחוץ למערכת השמש. וולשצ'אן אמר לי שהמאמר המקורי של ליין היה עבורם כ"מגבר אמון", ששכנע אותו שהאותות שנמצאו בנתונים שלו היו אמיתיים. עד שלין חזר בו מהתוצאה שלו, וולשצ'אן ביצע מספיק בדיקות כדי להיות בטוח בגילוי.

טעויות (Blunders), מהוות חלק חיוני של התהליך המדעי. מחקר אף פעם אינו מהלך ליניארי אל עבר האמת, אלא נתיב עקלקל, שמעורבים בו בניסוי וטעייה. טעויות אינן נחלתם הבלעדית של מדענים מרושלים או חסרי ניסיון. אפילו המדענים המזהירים ביותר - כולל צ'ארלס דרווין ואלברט איינשטיין - עשו טעויות חמורות.

רעיונות חדשניים באמת דורשים נכונות לאמץ סיכונים, וקבלת העובדה כי טעויות יכולות לפתוח שער להתקדמות. דבר זה אמנם ידוע בכמה חברות פרטיות העוסקות במחקר ופיתוח, אך האקדמאים כיום איטיים בהכרה בנחיצותן של טעויות. הכימאי לינוס פאולינג ידע זאת. פוסט-דוקטורנט לשעבר שלו, ג'ק דוניץ, נזכר כי פעם הוא אמר לו: "טעויות לא מזיקות במדע כי יש הרבה אנשים חכמים שם בחוץ, שיכולים מיד לזהות טעות ולתקנה. לכל היותר תעשה מעצמך טיפוש אך אין בכך שום נזק למעט לגאוה שלך. אם, לעומת זאת, מדובר ברעיון טוב, ואתה לא מפרסם אותו, המדע עלול לסבול מכך הפסד."

בעיית קשירות (KNOTTY PROBLEM)

רעיונות מופרכים יכולים להוביל לתובנות חשובות. בשנת 1867 הציע הפיזיקאי הנודע ויליאם תומסון (לורד קלווין) את הרעיון כי אטומים אינם נקודתיים אלא "מערבולות קשורות של צינורות של האתר" [3]. אתר זה היה החומר המשוער שמילא את החלל וסיפק תווך לחשמל ולמגנטיות.

בהשראת עבודה על מערבולות בזורמים (נוזלים או גזים) שנעשתה על-ידי הפיסיקאי הגרמני בן המאה התשע-עשרה הרמן פון הלמהולץ, זיהה קלווין שלושה מאפיינים של מערבולות קשורות של צינורות שהפכו אותן למודלים אטרקטיביים עבור אטומים.

* בכנס מורי הפיסיקה תשע"ז נשא הכותב הרצאה לזכרו של פרופ' עמוס דה-שליט ברוח המאמר תחת הכותרת: "שגיאות גאוניות"

ראשית, מערבולות בגז או בנוזל הן יציבות באופן מדהים, וכל קשר יכול להיות מסווג על פי התכונות הגיאומטריות שלו דבר ששיקף עבור קלווין את "התכונות הייחודיות הבלתי ניתנות לשינוי" של האטומים. שנית, המגוון של היסודות הכימיים יכול לשקף את "המגוון האינסופי" של הקשרים האפשריים. לבסוף, בדיוק כמו הרטט של טבעות עשן, התנודות של מערבולות הצינורות של האתר יכולות לייצר קווים ספקטראליים אטומיים.

כדי להסביר את הטבלה המחזורית, היה על קלווין לסווג קשרים לפי צורתם ולהיפטר מכל אלה שיכולים לעבור מאחד לשני על ידי מניפולציה. בתיאוריה של קלווין, ה-'unknot' המעגלי ייצג את אטום המימן; משולש ה-'looped trefoil' ייצג את אטום הפחמן.

התיאוריה של קלווין על אטומי המערבולת מוטעית בעליל! האתר אינו קיים כלל. אבל כשלים אלה לא הרתיעו את כולם. בעוד שהפיזיקאים איבדו בכך עניין לזמן מה, קשרים החלו להעסיק מתמטיקאים והפכו לתחום מחקר פעיל במשך עשרות שנים.

בשנות השמונים, תורת הקשרים התחברה מחדש לפיסיקה. המתמטיקאי ווהן ג'ונס (Jones) גילה ביטוי אלגברי ייחודי עבור כל קשר. הפיזיקאי אדוארד ויטן (Witten) קישר זאת לתורת השדות הקוונטית, הענף של הפיסיקה המתאר שדות ואת העולם התת-אטומי. בפיסיקה הקלאסית, הנתיב של חלקיק הנע מנקודה א' לנקודה ב' נקבע על ידי חוקי התנועה של ניוטון. בתחום הקוונטי, יש להתחשב בכל את הדרכים האפשריות המחברות בין A ל-B, כולל דרכים מפותלות וקשורות.

עבודה מאוחרת יותר שבה אל הרעיון של קלווין כשחיברה בין קשרים, תורת השדות הקוונטית ותיאוריית המיתרים, ותיארה חלקיקים כתנודות של מיתרים. היום, קשרים נמצאים בשימוש בכימיה ובביולוגיה בניחוח של פעולות אנזימיות על מולקולות דנ"א. בתהליך המכונה רקומבינציה ספציפית לאתר, אנזימים אחראים ליישור של קטעי הרצף הגנטי, לחיתוך של שני גדילי הדנ"א ולשחבור של ארבעת הקצוות הפתוחים בדרכים שונות, אשר ניתן לתארן באמצעות תורת הקשרים.

טענות יוצאות דופן

לפעמים קשה לתקן שגיאות חריגות. ניסויים מודרניים יכולים להיות מורכבים כל כך, ולדרוש השקעות עצומות כל כך במשאבי זמן וכסף, ששכפולם הופך לבלתי אפשרי. כאשר קיימת הסכמה רחבה לכך שתוצאה משוערת תהיה מוטעית, רק למספר זעום של מדענים יש מוטיבציה לחזור על הניסוי.

אבל, מצד שני, יכול להיות גמול למי שכן עושה זאת. התובנה הסנסציונית של הגיאומטריקובולוגים פליסה וולף-סימון (Wolfe-Simon) ועמיתיה, לפיה גילו חיידק המחליף זרחן בארסן לצורך הגדילה שלו, הביאה לגל של ביקורות.

כמה מבקרים בדקו את הניסוי, לרבות המיקרוביולוגית רזמרי רדפילד (Redfield) באוניברסיטת קולומביה הבריטית בונקובר, קנדה, והעלו לבלוג את התהליך (ראה go.nature.com/bmb62d). המאמץ הוכיח עצמו כפורה, בהראותו כי החיידק עושה מאמצים גדולים כדי להתחמק מארסן. רדפילד ועמיתיה לא זיהו שום ארסן בדנ"א של החיידק עד לערכים הרבה יותר נמוכים מאלו שצינו במאמר המקורי. הביולוג המולקולרי דן תאופיק (Tawfik) וצוותו במכון ויצמן למדע ברחובות, ישראל, זיהו את המנגנון שבאמצעותו חלק מן החלבונים של חיידק זה, ושל חיידקים הקרובים אליו, מתקשרים לזרחן ולא לארסן.

למרות לקח אחד ברור - טענות יוצאות דופן דורשות ראיות יוצאות דופן - למאמר המקורי עדיין היה ערך מדעי מסוים - הוא עורר דיון ויצר סקרנות לגבי אפשרויות שונות של חיים.

במאה התשע עשרה כתב הסופר הסקוטי סמואל סמייילס: "לעתים קרובות אנו מגלים מה יפעל, על ידי מציאת מה לא יפעל; וכנראה שמי שלעולם לא עשה טעות גם מעולם לא גילה שום תגלית." אין להתייחס לדבריו כאל סנגוריה על המדע, אלא כאל עידוד לחשיבה מקורית וללקיחת סיכונים מחושבים.

האם איינשטיין אמר אי פעם "השגיאה הגדולה ביותר שלי"?

כמעט כל תיאור היסטורי של 'הקבוע הקוסמולוגי' של אלברט איינשטיין מזכיר את "השגיאה הגדולה ביותר" שלו - ההוספה של קבוע זה למשוואות המאפיינות את היקום כנגד השפעתה של הכבידה.

האם איינשטיין באמת אמר זאת? לאחר שבדקתי עשרות מסמכים בזמן שערכת את המחקר לכתיבת ספרי לא מצאתי לכך שום הוכחה.

נראה שהביטוי "השגיאה הגדולה ביותר" הגיע מהפיזיקאי הצבעוני ג'ורג גאמוב במאמר שפורסם בגיליון ספטמבר 1956 של סיינטיפיק אמריקן. גאמוב חזר על הסיפור באוטוביוגרפיה שלו משנת 1970, "קו העולם שלי".

איינשטיין אכן לא היה מרוצה מכך שהציג את הקבוע הקוסמולוגי, ואמר במכתב לקוסמולוג ז'ורז' למטר כי הוא "אינו מסוגל להאמין שדבר מכוער כזה צריך להתממש בטבע". הכינוי "השגיאה הגדולה ביותר" היה, לדעתי, ביטוי לזעזוע של גאמוב.

האם מתן פתח לטעויות מחקר יכול להתאים לאווירה של ימינו המונעת על ידי הרצון להשפיע והמאופיינת בקצב מהיר וברעב למימון? אני מאמין שזה מחויב המציאות. אנחנו חייבים לפנות מקום ולאפשר העלאה של הצעות מדעיות בעלות סיכוי הפרכה גבוה בתהליכי הערכה וקבלה של הצעות מחקר.

עד לפני עשר שנים, עודדו הוועדות שהקצו זמן צפייה בטלסקופ החלל האבל לתת עד 10% מזמן התצפית להצעות עם הסתברות נמוכה להצלחה, אבל פוטנציאל חזרה גבוה. אפשר להרחיב פילוסופיה זו.

בעיה אחת היא שוועדות נוטות לא לאשר תכניות עם סיכון גבוה לכישלון. המאמצים להגיע לקונצנזוס מתכנסים לממוצע. ניתן להתגבר על מכשולים כאלה אם משאירים את ההחלטות בידי של אדם אחד. במקרה של האבל, מאגר זמן של זמן "לשיקול דעתו של מנהל המכון" לשימוש בטלסקופ, מאפשר לכל אחד להגיש בקשה. משם צמח שדה האבל העמוק (The Hubble Deep Field - HDF), אחת התמונות המפורסות ביותר של היקום שנעשו אי פעם.

כיום, הטלסקופים, כולל טלסקופ האבל, מופנים למציאת ההשלכות העמוקות של "טעות" נוספת. איינשטיין הצטער על ניסיונו ליצור דגם של יקום סטטי באמצעות כוח כבידה דוחה (ראו בתיבה: "Did Einstein ever say 'biggest blunder?'"). אבל מאז שהתגלה על ידי תצפיות בסופרנובות ב-1998 שהיקום שלנו מאיץ, ההבנה של טיבו של הכוח הדוחה היא אחד האתגרים הגדולים ביותר שבפניהם עומדת הפיסיקה היום.

החוקרים חייבים להכיל טעויות הנובעות מחשיבה מחוץ לקופסה. תהליכי הערכה צריכים לאפשר מקוריות, גם עם הסיכון להתחלות שווא ולסמטאות ללא מוצא.

Mario Livio is an astrophysicist who worked with the Hubble Space Telescope till 2015. He is now a Visiting Scientist at the Weizmann Institute.

הספר שלו "שגיאות גאוניות" יצא בהוצאת אריה ניר.

1. Bailes, M., Lyne, A. G. & Shemar S. L. *Nature* **352**, 311–313 (1991).
2. Lyne, A. G. & Bailes, M. *Nature* **355**, 213 (1992).
3. Thomson, W. *Proc. R. Soc. Edinb.* **6**, 94–105 (1867).
4. Wolfe-Simon, F. *et al. Science* **332**, 1163–1166 (2011).
5. <https://myalberteinstein.com/2013/08/10/did-einstein-ever-say-biggest-blunder/>