

מהעכברים של סינדרלה עד חוק שימור המוזרות על "חוקי שימור" באגדות ילדים ובמיתוסים ובפיזיקה המוזרנית

בהוקרה עמוקה לד"ר ניסן שיינין
מנהל המכללה תשכ"ט - תשמ"ח
ולסגניתו, הגב' אסתר מישאל

"בניגוד למיתוס העתיק, אין החוכמה פורצת החוצה בשלה
ומושלמת כאתינה מראשו של זאוס; היא נבנית באיטיות, צעד
אחר צעד, מהתחלות בלתי-רציונאליות עד מאד" (בטלהיים,
תש"ס, עמ' 9)

"דומה כי מה שדרוש לפרט הוא - לחזור במרוצת חייו על התהליך
ההיסטורי של התפתחות החשיבה המדעית" (שם, עמ' 46)

"צריך שמשוהו ישתמר, שאם לא כן אי אפשר לחשוב" (הנרי
פואנקרה [Poincaré, 1854-1912], מתמטיקאי ופיזיקאי, מצוטט
בפי ז'אן פיאז'ה אצל ברינגייה, 1988, עמ' 47)

החוקים הבסיסיים ביותר של העולם הפיזי הם חוקי שימור כמותיים,
כמו חוק שימור המסה, חוק שימור האנרגייה וחוק שימור המטען החשמלי.
שתי טענות עיקריות מועלות במאמר זה: ראשית, שבנפש (mind, "פנימה")
של האדם טבועה מעין ציפייה מוקדמת לשימור, אלא שאין היא בהכרח
ציפייה לשימור כמותי, המתקיים בפועל על פי המחקר המדעי, כי אם
לשימור של "איכות", "מהות" או "זהות פנימית" שדווקא אינן משתמרות
במציאות; שנית, שאפשר למצוא רמזים לטענה הראשונה במיתוסים
מסוימים ובאי אלו גרסאות של אגדות ילדים.

* צבי עצמון מלמד בחוג למדעים, במסלול לחינוך המיוחד ובמכונים לטיפול באמנות
ולסיוע באמצעות בע"ח. פרסם שבעה ספרי שירה וספר מדעי פופולרי על מוח האדם.
הוא העורך המדעי של הירחון "גליליאו" וערך ספרי מדע פופולרי.

א. היסטוריה וערכים כמותיים

החוקים הבסיסיים ביותר של העולם הפיזי שאנו חיים בו הם חוקי השימור. אכן, חוקי השימור הם החוקים הנשמרים ביותר בטבע החומרי. אחד מחוקי השימור המפורסמים ביותר הוא "חוק שימור החומר". חוק שימור החומר פירושו חוק שימור **כמות** החומר, ולא חוק שימור **טיב** החומר, לאמור - הוא חוק שימור המסה. אפשר לנסחו למשל כך: חומרים הכלולים במערכת סגורה יכולים לעבור שינויים רבים (למשל - במצב צבירה, בתכונות כימיות) אך הכמות הכללית של החומר במערכת נשמרת - אינה גדלה ואינה קטנה; זאת בתנאי שבמערכת אין מתרחשים תהליכים גרעיניים ושהמערכת נמצאת במהירויות זניחות ביחס למהירות האור (שסימנה המקובל c, ושערכה 300,000 ק"מ לשנייה בערך).

מניסוח זה של אחד החוקים המפורסמים ביותר המתארים את עולמנו הפיזי אפשר ללמוד שתי תכונות עקרוניות של חוקי השימור בכלל: ראשית, מדובר במערכת סגורה, לאמור - חלק של היקום שאינו מחליף עם שאר היקום (לאמור - עם ה"סביבה") גורמים הרלוונטיים לחוק. כך למשל המערכת הכלולה בתוך בקבוק שקוף ופקוק היטב אינה מחליפה חומר עם העולם שמחוץ לבקבוק, הגם שהיא יכולה להחליף אור וחום עם הסביבה החיצונית. שנית, גם במערכת סגורה חוקי השימור תקפים לעתים רק בהגבלות מסוימות. שהרי (לפי תורת היחסות הפרטית) אם נאיץ את הבקבוק למהירות גבוהה מאוד, למשל - 90% ממהירות האור, ואפילו 1% ממנה, המסה שלו תגדל. כך גם אם הבקבוק מכיל חומר רדיואקטיבי, העובר תהליכים גרעיניים.

את חוק שימור החומר בתהליכים כימיים הדגים לראשונה הכימאי הצרפתי אנטואן-לורן לבואזיה (Lavoisier, 1743-1794). הוא שקל מערכות סגורות שהתחוללו בהן ריאקציות כימיות לפני התהליך (משקל חומרי המוצא) ולאחר התהליך (משקל התוצרים). לבואזיה נמנה עם מעמד האצילים. המהפכנים העמידו אותו למשפט, וראשו נערף בגיליוטינה.

"המהפכה אינה זקוקה לכימאים", אמר שר בממשלה המהפכנית לשמע גזר הדין.

על פי התורה האטומית של ג'ון דלטון (Dalton, 1766-1844) התהליכים הכימיים מתרחשים בין אטומים של יסודות שונים. מאחר שלכל יסוד כימי אטומים בעלי מסה אופיינית, ומאחר שמספר האטומים נשמר, ממילא מסבירה התורה האטומית את חוק שימור המסה של לבואזיה.

אנרגייה - מהות חמקמקה אך נשמרת

סיפורו של "חוק שימור האנרגייה", אף הוא חוק ידוע מאוד, הוא סיפור מורכב הרבה יותר. במערכות סגורות "אידאליות" - מערכות נטולות חיכוך שהגופים בהם אלסטיים (לאמור, שומרים על צורתם בעקבות התנגשויות) - משתמר גודל המכונה "אנרגייה מכנית". האנרגייה המכנית היא הסכום של אנרגיית התנועה במערכת (האנרגייה הקינטית: $\frac{1}{2}mv^2$; m - מסת הגוף, v - מהירותו), האנרגייה הפוטנציאלית של הגובה (ערכה mgh ; h - גובה הגוף ביחס לנקודת ייחוס, g - תאוצת הנפילה החופשית) ואנרגייה אלסטית של קפיץ (ערכה $\frac{1}{2}kA^2$; k - "קבוע הקפיץ", A - מידת ההתארכות שלו), אם יש כזו במערכת.

את חוק שימור האנרגייה המכנית ניסח בפעם הראשונה הפילוסוף והמתמטיקאי גוטפריד וילהלם לייבניץ בשנת 1693. הוא הראה שבמערכת מכנית אידאלית סגורה הסכום של האנרגייה הקינטית והפוטנציאלית הוא גודל קבוע.

ואולם האנרגייה המכנית נשמרת רק במערכות נטולות חיכוך. בתנאי חיכוך אנרגיית התנועה קטנה והולכת - זו הסיבה שיש להפעיל את מנוע המכנית כשרוצים לנסוע במהירות קבועה בכביש אופקי. התקדמות עצומה בדרך לחוק שימור כולל של אנרגייה - ולא רק אנרגייה מכנית במערכות אידאליות - הייתה ההבנה שהחום הוא סוג של אנרגייה, אנרגייה לא-מכנית. זמן רב לא היה ברור מה מהותו של החום. ייחסו לו תכונות של כעין "נוזל" הזורם מטמפרטורה גבוהה לטמפרטורה נמוכה יותר, וכינו אותו "קלוריק". לבואזיה אף כלל "חומר" זה, ה"קלוריק", בטבלת היסודות הכימיים שלו:

מי שהוכיח במפורש כי חום איננו חומר, ולו חומר מוזר, אלא צורה של אנרגייה היה גאון נפתל דרך, הרוזן הבווארי רמפורד (Rumford, 1753-

1814), הלא הוא האמריקאי בנג'מין תומפסון. רמפורד טען כי עקב החיכוך תנועה הופכת לחום. הוא אף עשה אומדן ראשון של שווה הערך החומני של העבודה המכנית, ובכך פתח את הדרך לחוק הכלל של שימור האנרגיה.

סיפור חייו של רמפורד (בנג'מין תומפסון) הוא כעין סיפור אגדה רב תהפוכות. בנערותו למד בכוחות עצמו, ובגיל 18 היה למנהל בית ספר בעיירה רמפורד, ניו המפשייר. בגיל 19 נשא לאישה אלמנה עשירה בת 31. במהלך מלחמת השחרור של ארצות הברית ריגל לטובת הבריטים. כשנחשף ברח בעור שיניו לבריטניה. שם שימש פקיד בממשלה, ומאוחר יותר היה סגן אלוף בצבא בריטניה. ב-1784 הוכתר בתואר אבירות והפך לסיר בנג'מין. באישור מלך בריטניה עבר לשרת את מלך בוואריה בתפקיד שר המלחמה והמשטרה וראש לשכה. במסגרת תפקידו יזם רפורמות סוציאליות חשובות, הביא לבוואריה את מנוע הקיטור, שיפר מבנה של ארובות ותנורי מטבח (תנורי הבישול שהגה רמפורד הוסיפו לשמש במטבחים במשך שנים רבות, עד שהוחלפו בתנורי גז) והכניס לבוואריה את תפוחי האדמה כמזון בסיסי. הוא גם הקים בתי מחסה וצייד אותם במיטב השכלולים של התקופה: מתקני תאורה וחिמום. במסגרת תפקידו התעניין רמפורד בקדיחת קני תותחים והתרשם מן החום העצום המופיע בתהליך הקדיחה. אז החל לחקור את הקשר שבין חיכוך לחום. בתקופה זו היה בקשר עם מרי אן, אלמנתו של לבואזיה ערוף המהפכה, ואף נשא אותה לאישה. מרי אן לבואזיה הייתה אפוא אשתו של התומך הנלהב בתאוריה שהחום הוא חומר נוזלי, ולאחר מכן - של האויב הגדול של תאוריה זו, האיש שסייע להסיר אותה מעל בימת המדע. בשנת 1791 הוכתר לרוזן ובחר לכנות עצמו פון רמפורד, על שם העיר שנאלץ לעזוב בבושת פנים. ב-1798 חזר לבריטניה; הבריטים מספרים עד היום בגאווה שהוא "פיזיקאי בריטי".

ההכרה כי חום אינו חומר מוזר אלא צורה של אנרגייה הביאה להרחבת חוק שימור האנרגייה: הירידה באנרגייה המכנית של המערכת שווה לעלייה באנרגייה התרמית, כך שהכמות הכוללת של האנרגייה נותרת קבועה (ובלבד שהמערכת אינה מחליפה אנרגייה עם הסביבה); חוק שימור

האנרגייה בנוסח הכולל גם אנרגייה תרמית הוא גם "החוק הראשון של התרמודינמיקה". מאוחר יותר התברר כי החומר הרגיל שסביבנו בנוי מחלקיקים, מולקולות, וכי האנרגייה התרמית קשורה לאנרגייה הקינטית של המולקולות, כך שחיכוך הופך למעשה תנועה מסודרת של גושי חומר (למשל - של המכונית) לתנועה אקראית של מולקולות (חום בצמיגים, כביש, בגוף המכונית, באוויר).

יותר מ-40 שנה לאחר ניסויי הקדיחה של רמפורד, הזיהוי שהחום הוא סוג של אנרגייה והאומדן הראשוני של שווה הערך החומני של אנרגייה מכנית, מצא הפיזיקאי הבריטי גיימו פרסקוט ג'אול (Joule) כי אנרגיית החום שמפיק תיל מוליך חשמל מתכונתית (פרופורציונית) למכפלת ריבוע הזרם החשמלי (i^2) בהתנגדות (R), לאמור - מתכונתית למכפלת הזרם במתח החשמלי (V), iV . ג'אול גם שיפר מאוד את אומדן שווה הערך החומני של אנרגייה מכנית, וזאת על ידי מדידת עליית הטמפרטורה של מים עקב בחישתם באמצעות מערבול.

בתקופה שבה ערך הפיזיקאי ג'אול את מדידותיו המדויקות היה יוליוס רוברט מאייר (Mayer) רופא צעיר באנייה הולנדית שהפליגה לאיי האוקיינוס ההודי הטרופי. כשהקיו דם מוורידיהם של מלחים חולים התרשם מצבע הדם האדום בהיר, שדמה יותר לדם עורקי, עשיר בחמצן, מלדם ורידי שהכיר מחולים באירופה. הוא הגיע למסקנה כי באזורים הטרופיים הגוף צריך להפיק פחות חום, ולפיכך קצב חמצון החומרים האורגניים שמקורם במזון נמוך יותר, וכך נעשה פחות שימוש בחמצן שבדם. כששב מן ההפלגה היה לרופא בגרמניה והגה את חוק שימור האנרגייה, ובכלל זה גם האנרגייה הכימית שבמערכת חומר אורגני / חמצן. מאחר שהיה רופא, לא היה בקיא בפיזיקה ובמתמטיקה וניסוחיו לא נתקבלו על דעת העורכים של כתבי העת המדעיים הרלוונטיים. כך, האיש שהיה בין הראשונים שפיענחו את אחד החוקים הבסיסיים ביותר של העולם החומרי נותר דחוי, שבע מרורים ותסכול. מאוחר יותר השתלם בפיזיקה וכתב מאמר משופר, אך בתהילה זכה ג'אול, ואילו ממאייר התעלמו. הוא ניסה להתאבד (גם בכך נכשל...) ואושפז בבית חולים לחולי נפש. רק שנים מאוחר יותר זכו הארתו ותרומתו החלוצית בהכרה מדעית.

אכן, חוק שימור האנרגייה עבר גלגולים רבים, כשם שהאנרגייה שעליה הוא נסוב עוברת גלגולים, בעוד ערכה הכמותי נשמר. מה היא אותה אנרגייה שערכה הכמותי נשמר? על כך נדמה שאין למדע תשובה הולמת. נוהגים להגדירה בתור "היכולת לבצע עבודה". ואולם סיר ארתור אדינגטון (Eddington), אחד האסטרופיזיקאים החשובים במאה ה-20, טען כי "אנרגייה אינה אלא אותו משהו שנקרא בשם 'אנרגייה'...", ואילו הפיזיקאי המבריק והשובב ריצ'ארד פיינמן (Feynman; חתן פרס נובל לפיזיקה 1965) טען כי "בפיזיקה של ימינו איננו יודעים אנרגייה מהי". אכן, הפיזיקה חזקה מאוד בתיאורים כמותיים מדויקים; הרבה פחות היא מספקת תשובות לשאלות על ה"מהויות" של הגדלים הנמדדים.

שימור האנרגייה כנראה אינו קל לעיכול מבחינת התפיסה האנושית. עד היום ממשיכים לזרום למשרדי הפטנטים במדינות שונות הצעות ליצירת אנרגייה בבחינת יש מאין, "פֶּרֶפְטוּאוּם מוּבִּילָה" (ובארץ זכורה הפאוסה הגדולה של "המצאת מרידור" מלפני כמעט שנות דור...). עד כדי כך שבמדינות מסוימות קיבלו משרדי רישום הפטנטים הוראה לדחות על הסף כל הצעה שיש בה משום "פרפטואום מובילה", אלא אם כן הממציא צירף לא רק תכנית מסורטטת אלא גם דגם פועל...

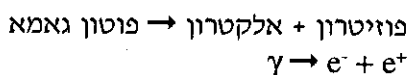
טלטלת היחסות

על סף המאה ה-20, כשנדמה היה שסוף סוף תמה מסכת הייסורים והגלגולים שהיו מנת חלקו של חוק שימור האנרגייה, גילה הנרי בקרל (Becquerel) את הרדיואקטיביות. הגילוי הזה היה אקראי ובלתי צפוי, מהסוג המתואר באנגלית במילים "out of the blue" ("מתוך הרקיע הכחול"), ואולם מבחינה היסטורית דווקא ימי פברואר מעוננים וסרט צילום הם שסייעו לגילוי המקרי של בקרל. לפתע ניצב חוק שימור האנרגייה לפני אתגר עצום - השאלה מה מקור האנרגייה האדירה של חומרים רדיואקטיביים. והרחק הרחק ברקע עמדה גם בעיית מקור אנרגיית הקרינה של השמש.

והנה, ב-1905, אחת השנים המופלאות בתולדות המדע, פרסם עובד במשרד הפטנטים השווייצר, פלוני ששמו אם אינני טועה אלברט איינשטיין, את תורת היחסות (הפרטית), ולפיה חומר ואנרגייה הם בני המרה, וערך ההמרה

ניתן בנוסחה המפורסמת $E=mc^2$. או אז יכול היה להסתמן פתרון לבעיית האנרגייה של חומרים רדיואקטיביים; אנרגייה חדשה יכולה הייתה לזכות בהכרה - אנרגייה גרעינית; ניתן רמז ראשון לפתרון (פתרון שהוצע רק שנים מאוחר יותר) לבעיית מקור האנרגייה של השמש וכוכבי השבת; והונחה תשתית מדעית לאנרגיית הביקוע (fission; האנרגייה שבבסיס "פצצת האטום"), לכורי כוח גרעיניים ולאנרגיית המיזוג (fusion; האנרגייה שבבסיס "פצצת מימן"). שני החוקים ההיסטוריים, חוק שימור המסה וחוק שימור האנרגייה, מוזגו לחוק שימור משותף, חוק שימור המסה-אנרגייה.

אכן, המרת מסה ("מסת מנוחה") לאנרגייה היא תופעה שגרתית כשמדובר בעולם החלקיקים. תהליך אופייני בהקשר זה הוא אִיון (אניהילציה): מפגש של חלקיק (למשל - אלקטרון, e^-) עם האנטי-חלקיק שלו (במקרה זה - פוזיטרון, e^+) גורם "למחיקת" מסות המנוחה והופעת אנרגיית קרינה "טהורה", בצורת פוטונים, "חלקיקי" קרינה. בעולם החלקיקים מתרחשת גם המרה הפוכה. למשל, "גושיש" של אנרגיית קרינה אלקטרומגנטית - פוטון גאמא (γ), יכול בנסיבות מתאימות להפוך לזוג חלקיק-אנטי-חלקיק, כמו אלקטרון ופוזיטרון:



שיקולי שימור המסה-אנרגייה הניעו את וולפגנג פאולי (Pauli), מן האבות המייסדים של מכניקת הקוואנטים, להציע (1931) את קיומו של חלקיק חמקמק, שלִימים זכה לכינוי "ניטרינו". וזה עיקרו של הסיפור: בהתפרקות ביתא (וביתר פירוט: התפרקות ביתא שלילית), גרעיני אטומים בלתי יציבים מסוימים פולטים קרינת ביתא - לאמור: אלקטרונים, ובתוך כך הופכים לגרעינים של יסודות אחרים. והנה התברר כי ברוב המקרים מסת האלקטרון הנפלט ואנרגיית התנועה שלו אינן ממלאות את הפער שבין המסה-אנרגייה של הגרעין המקורי לזו של הגרעין שהוא תוצר התהליך. פאולי הציע שלא לוותר ולהניח שעקרון שימור האנרגייה מופר, וגרס כי השימור מתקיים גם בתהליכי התפרקות ביתא, וכי האנרגייה החסרה-לכאורה נישאת על ידי חלקיק נוסף,

חמקמק, שלא זוהה. נוסף על שיקולי שימור האנרגייה הניעו אותנו גם שיקולי שימור התנע.

שימור התנע, התנע הזוויתי (סיבובי)

תנע (או: תנע קווי; p) הוא מכפלת המסה במהירות: $p = mv$. גודל זה, התנע, הוא גודל שערכו נשמר תמיד, ובלבד שמדובר במערכת סגורה. בניגוד לאנרגייה, שיכולה ללבוש "צורות" שונות ולהתגלגל מצורה לצורה, התנע הוא "פשוט", אין לו "צורות" שונות. ובניגוד למסה ולאנרגייה שהם סקלרים (ערכים בעלי גודל בלבד, חסרי כיוון), תנע הוא וקטור - תיאורו כולל גודל וכיוון. כשדג שוחה במים קדימה, הוא דוחף בסנפיריו את המים לאחור, וכך התנע הכללי נשמר - התנע של הדג שווה בערכו והפוך בכיוונו לתנע המים שדוחפים הסנפירים. לטיל הניצב במנוחה על מתקן השילוח אין תנע. כדי להניע את הטיל כלפי מעלה המנוע שלו פולט תוצרי שריפה במהירות רבה כלפי מטה. יש המְרָאה! אדם עומד במנוחה ואז מתחיל לפסוע קדימה - תוך כדי כך רגליו דוחפות את כדור-הארץ בכיוון הפוך, והתנע הכללי, שהיה אפס בתחילה, נותר אפס (אי אפשר כמובן להבחין בשינוי במהירות כדה"א, בגלל המסה הענקית שלו). ירייה גורמת להתקדמות מהירה מאוד של הקליע, ובה בעת הרובה נרתע בהכרח לאחור, זהו הִרְתַע.

בתנועה מעגלית ממלא התנע הזוויתי (התנע הסיבובי) תפקיד מקביל לזה של התנע הקווי בתנועה ישרה, וגם הוא וקטור. אלא שבמקום מהירות קווית מופיעה כאן מהירות זוויתית (ω); מובעת ביחידות כגון מעלות-קשת לשנייה, רדיאנים לשנייה, סיבובים לדקה וכו' ובמקום מסה מופיעה כאן ההתמדה הסיבובית (ההתמדה הזוויתית, I): ωI . ההתמדה הסיבובית עצמה תלויה במסה אך גם בתחלוקתה על פי המרחק האנכי מציר הסיבוב.

גם התנע הזוויתי הוא גודל נשמר. כך, למשל, כשמחליק על הקרח מסתחרר בידיים פרושות יש לו תנע זוויתי מסוים. ואז, אם הוא מצמיד את ידיו לגופו, ההתמדה הזוויתית שלו (I) קטנה (שהרי המסה התקרבה לציר הסיבוב), ולפיכך מהירות הסיבוב שלו (ω) גדלה לקול תשואות הצופים. בדומה לכך, כשכוכב מסיבי קורס תחת הכבידה העצומה שלו והופך לכוכב נייטרונים, הרדיוס שלו קטן בסדרי גודל רבים מאוד, ולפיכך זמן הסיבוב

שלו סביב צירו מתקצר מאוד - אם כוכב כזה פולט קרינת רדיו הרי הוא פולסר, שלאותות הרדיו שלו זמן מחזור קצרצר (סדר גודל של שנייה). חוק שימור התנע הזוויתי מסביר גם את אחד הגילויים החשובים של האסטרונום האגדי יוהנס קפלר (Kepler): מהירותו של כוכב לכת לאורך מסלולו האליפטי אינה קבועה; המהירות גבוהה יותר בקרבת הפריהליון - כשכוכב הלכת קרוב לשמש, ונמוכה יותר כשהוא מרוחק במסלולו מהשמש. שהרי בקרבת הפריהליון ההתמדה הזוויתית קטנה, כך שכדי שיישמר התנע הזוויתי המהירות גדלה, ולהפך.

לחלקיקים תת-אטומיים - כגון אלקטרון, פרוטון, נייטרון ופוטון, יש כעין תנע זוויתי. על פי מכניקת הקוואנטים התנע הזוויתי של חלקיקים כאלה אינו רציף, אלא יכול לקבל רק ערכים בדידים מסוימים, כלומר - הוא "מקוונט". ערך זה מכונה "ספיין". ערך ה"ספיין" של האלקטרון הוא $1/2$ (ביחידות של \hbar -באר, הקבוע של פלאנק כשהוא מחולק ב- 2π), והוא יכול להיות פלוס חצי או מינוס חצי. גם ה"ספיין" של הפרוטון הוא $1/2$ וכך גם של הניטרון. נבחן למשל התפרקות ביתא שלילית שבה הופך נייטרון (n) לפרוטון (p) אגב פליטת אלקטרון (e^-):

$$n \rightarrow p + e^-$$

כאן לא נשמר, לכאורה, התנע הזוויתי המכונה ספיין - יש תוספת של חצי יחידה (אם לפרוטון ולאלקטרון "ספינים" באותו כיוון; לשניהם פלוס או לשניהם מינוס) או היעלמות של חצי יחידה (אם לאחד מהם פלוס ולשני מינוס, כך שסך כל התוצרים הוא 0, בעוד שלניטרון "ספיין" = $1/2$ יחידה).

אנריקו פרמי (Fermi), מגדולי הפיזיקאים של המאה ה-20 וחתן פרס נובל 1938; איטלקי שברח לארצות הברית מאימת הפשיסטים - אשתו הייתה יהודייה. הקים את הכור הגרעיני הראשון בהיסטוריה, ב-1942, באוניברסיטת שיקגו) ניסה להתמודד עם סתירה זו לחוק השימור בהתבססו על התאוריה של פאולי בדבר חלקיק חמקמק נוסף שנפלט בתהליך. פרמי כינה חלקיק זה בשם "ניטרינו" (באיטלקית: נייטרון קטן), ושיער שהוא בעל "ספיין" $1/2$ וחסר מטען חשמלי. בזכות הניטרינו החמקמק בא להתפרקות ביתא גואל מבחינת שימור האנרגיה ומבחינת שימור ה"ספיין". את הניטרינו עצמו, "שומר הותם השימור", זיהו קלייד

קואן ופרדריק ריינס (Cowan, Reines) בשנות החמישים; כעבור שנים זכה ריינס בפרס נובל (1995) עבור גילוי הניטרינו. אגב, החלקיק הנוצר בהתפרקות ביתא שלילית אינו מוגדר כיום "ניטרינו", אלא "אנטי-ניטרינו של האלקטרון".

חלקיקים שלהם "ספין" שאינם שלם מכונים "פֶרְמיוֹנִים" (על שם פרמי) - ובהם אלקטרון (ופוזיטרון כמובן), פרוטון, נייטרון, נייטרינו (ואנטי-ניטרינו). חלקיקים שלהם "ספין" שלם (1 או 0) מכונים "בוזונים", ביניהם הפוטון ("ספין" = 1). לפי חוק השימור, אם פוטון גאמא ("ספין" 1) הופך לזוג אלקטרון ("ספין" $1/2$) ופוזיטרון ("ספין" $1/2$), ה"ספינים" של האלקטרון ושל הפוזיטרון חייבים להיות שווי כיוון, ובעלי כיוון שווה לזה של הפוטון המקורי, כך:

$$+1 \rightarrow (+1/2) + (+1/2)$$

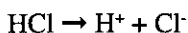
או:

$$-1 \rightarrow (-1/2) + (-1/2)$$

שימור המטען החשמלי

ניסוחו של חוק שימור המטען החשמלי הוא ניסוח פשוט: מטען חשמלי נטו אינו נוצר יש מאין ואינו נעלם.

דוגמה לשימור המטען החשמלי היא היפרדות (דיסוציאציה) של מולקולות מימן כלורי (HCl) ליוני מימן (H^+) וכלוריד (Cl^-) בעת המסתן במים:



חשבון השימור הוא פשוט: למולקולת מימן-כלורי אין מטען חשמלי נטו, והיא נפרדת ליון חיובי וליון שלילי:

$$0 \rightarrow +1 + (-1)$$

דוגמה מתחום החלקיקים התת-אטומיים היא התפרקות ביתא שלילית של נייטרון, שבה חלקיק חסר מטען חשמלי, הניטרון, מתפרק לפרוטון (מטען חשמלי +1), לאלקטרון (מטען חשמלי -1) ואנטי-ניטרינו חסר מטען, ובסך הכול:

$$0 \rightarrow +1 + (-1) + 0$$

ודוגמה נוספת: אִיוֹן (אניהילציה) של אלקטרון (-1) והאנטי-חלקיק שלו, פוזיטרון (+1), אגב יצירת שני פוטונים (שלכל אחד מהם מטען חשמלי 0):

$$(-1) + (+1) \rightarrow 0 + 0$$

מטענים "מוזרים" וחלקיקים "מוזרים"

לחוקי השימור נודע מעמד מיוחד בעולם החלקיקים התת-אטומיים, במכניקת הקוואנטים. חוקי שימור מיוחדים לעולם החלקיקים, חוקים שאין להם מקבילים בעולם המקרוסקופי, נגזרים מתהליכים שאינם מתרחשים אף על פי שאין הם סותרים את חוקי השימור ה"קלאסיים". במקרים אלה מצביעים הפיזיקאים על "מטענים" מיוחדים, מספרים קוואנטיים, שחלים עליהם חוקי שימור.

חוק שימור המספר הבריוני: בריונים הם חלקיקים המורכבים משלשות של חלקיקי יסוד המכונים קווארקים; עם קבוצת הבריונים נמנים בין השאר הפרוטון והניטרון. לכל בריון יש "מטען" (או: מספר) בריוני +1, ולכל אנטי-בריון (למשל, אנטי-פרוטון) מספר בריוני -1. לחלקיקים שאינם בריונים - כגון אלקטרון, פוטון וניטרינו, מספר בריוני 0. מתברר כי בכל התהליכים מתקיים "חוק שימור המספר הבריוני". בגלל חוק שימור זה, בכל מקרה שנוצר בריון מחלקיקים שאינם בריונים (כלומר, ש"המטען" הבריוני שלהם = 0), חייב תמיד להיווצר גם אנטי-בריון כלשהו, כך שתוספת המספר הבריוני בתהליך תהיה בסך הכול 0.

חוק שימור המספר הלפטוני: לֶפְטוֹנִים הם פרמיונים (כזכור - חלקיקים בעלי "ספין" שאינו שלם) שאינם מורכבים מקווארקים. עם קבוצת הלפטונים נמנים האלקטרון והאנטי-אלקטרון (לאמור, הפוזיטרון), והניטרינים - בהם האנטי-ניטרינו של האלקטרון, המשתחרר בהתפרקות ביתא שלילית, והניטרינו של האלקטרון (ν_e), המשתחרר בהתפרקות ביתא חיובית - הפיכת פרוטון לניטרון ופוזיטרון:

$$p \rightarrow n + e^+ + \nu_e$$

לכל לפטון מספר לפטוני +1, ולכל חלקיק שאיננו לפטון (למשל, פרוטון, נייטרון ופוטון) מספר לפטוני 0. חוק שימור המספר הלפטוני: בכל התהליכים נשמר המספר הלפטוני הכללי. למשל, בתהליך התפרקות ביתא החיובית שתואר מתקיים:

$$0 \rightarrow 0 + (-1) + (+1)$$

ראוי להבהיר כי -1 המופיע במשוואה איננו מטען חשמלי (לפוזיטרון מטען חשמלי חיובי!) אלא "מטען" לפטוני (הפוזיטרון הוא אנטי-חלקיק, ולפיכך המספר הלפטוני שלו -1); הפלוס אחד גם הוא אינו מציין מטען חשמלי (הנייטרון הרי חסר מטען חשמלי!) כי אם "מטען" לפטוני.

חוק שימור המוזרות: במהלך המחקר בחלקיקים תת-אטומיים בלתי יציבים מסוימים הבנויים מקווארקים הופתעו הפיזיקאים לעתים מאטיות התפרקותם ביחס למצופה לגביהם (אטיות היא דבר יחסי! מדובר בתהליכים המתרחשים, למשל, במיליארדית שנייה!). הדבר כה הפתיע את הפיזיקאים עד שהם כינו חלקיקים אלה בשם "מוזרים". עוד התברר כי חלקיקים "מוזרים" כאלה נוצרים בזוגות. לשם פתרון התעלומה הוצע שלחלקיקים אלה "מטען" מיוחד, מספר קוואנטי שזכה לשם "מוזרות" (strangeness). בניגוד למטען החשמלי, לתנע זוויתי, למספר הבריוני ולגדלים נשמרים אחרים שתיארנו, "מטען" המוזרות נשמר בפעולת חלק מן הכוחות ("הכוח הגרעיני החזק" והכוח האלקטרומגנטי) אך לא בכלם - מטען המוזרות איננו נשמר בפעולת "הכוח הגרעיני החלש". מטען המוזרות היה אחד הרמזים החשובים שהובילו את הפיזיקאים יובל נאמן ומורי גל-מן (Gell-Mann) לזיהוי חלקיקי היסוד, הקווארקים, שהבריונים בנויים כאמור משלושת שלהם. את השם קווארקים טבע גל-מן (חתן פרס נובל 1969; במקביל זכה נאמן בפרס איינשטיין).

לסיכום חלק זה: הפיזיקה - שכה היטיבה לזהות גדלים הכפופים לחוקי שימור שונים, ואף להסיק בעזרת חוקי שימור אלה על קיומם של חלקיקים חומריים שלא היו מוכרים קודם לכן, כגון חלקיקי הנייטרנו - לא בהכרח מסבירה את "מהותם" של הגדלים המשתמרים. מה "מהותו" של המטען

הבריוני? מה משמעותו של הגודל המכונה מוזרות, שנשמר בכל התהליכים המתרחשים בהשפעת הכוח הגרעיני החזק והכוח האלקטרומגנטי? ו"עם יד על הלב": מהי בעצם אנרגייה? בהמשך מאמר זה אטען כי ב-mind (בעבר הצעתי מקבילה עברית: פנימה, במלרע) של האדם טבועה איזו ציפייה אינטואיטיבית לשימור, אלא שציפיית א-פריורי זו היא לשימורה של איזו "מהות" איכותית, לאו דווקא לשימור כמותי. ואכן, נוכחנו כבר כי במקרים רבים זיהויים של חוקי השימור הכמותיים-פיזיקליים לא היה קל ואינטואיטיבי, כי אם לווה בהיסטוריה של המדע בחבלי לידה קשים.

ב. התפתחות קוגניטיבית ותפיסת שימור של כמויות ומספרים

בחלק א' נוכחנו כי חשיפתם של חוקי שימור כמותיים הייתה כרוכה במאמץ מדעי, לעתים התגברות על משוכות גבוהות, כמו הזיהוי שהחום הוא סוג של אנרגייה ולא חומר בעל תכונות מוזרות. חלק שני זה של המאמר אני מבקש לפתוח בציטוט (בקיצורים ובשינויים פעוטים) מתוך מחקרים שנועדו להתחקות אחר התפתחות התפיסה של חוקי שימור בקרב ילדים.

אסיסטנטית: "תסתכלי, נתחיל לשחק... תאמרי לי מה זה. מה זה? אני בטוחה שכבר שיחקת בזה... אלה 'חיילים' קטנים. מה צבעם של החיילים?"

נאדין, בת חמש: "יש ירוקים ויש אדומים."
[...]

אסיסטנטית: "אני לוקחת את הירוקים. עכשיו הסתכלי במה שאני עומדת לעשות. אני מניחה את החיילים הירוקים שלי כך. את רואה? אני מיישרת אותם. ואת, קחי את החיילים האדומים הקטנים והניחי אותם כפי שהנחתי אותם אני [...] ועכשיו אמרי לי מה את חושבת: האם יש אותה כמות של 'חיילים' ירוקים ו'חיילים' אדומים?" [...]

נאדין [מהססת]: "שניהם אותו דבר." [...]" אין יותר ירוקים ואין יותר אדומים."

אסיסטנטית: "אין יותר ירוקים ואין יותר אדומים! בסדר. תסתכלי על מה שאני עושה." [היא מפזרת, מרווחת, את ה'חיילים' האדומים] "עכשיו,

אמרי לי: האם יש אותו מספר של יחיילים אדומים ויחיילים ירוקים?
לא? מה יש יותר?"
נאדין: "אדומים."

[...]

אסיסטנטית: "אבל אמרי לי, נאדין, אם נספור אותם, את היחיילים
הקטנים האלה? אם נספור אותם באצבע? כמה יהיו אז? האם יהיה אותו
מספר של אדומים וירוקים, או שזה לא יהיה אותו דבר?"
נאדין: "זה לא יהיה אותו דבר!" [...]

(על פי ברינגייה, 1988, עמ' 42-43)

אסיסטנטית: "את רואה שם את שני הכדורים? את יודעת מה זה?"
טאימה, בת שש: "פלסטלינה."

אסיסטנטית: "פלסטלינה, כן. והצבעים?"

טאימה: "אדום."

אסיסטנטית: "ועוד?"

טאימה: "לבן."

אסיסטנטית: "זה לבן. אמרי לי, אם את מסתכלת היטב בכדורי
הפלסטלינה, האם את יכולה לומר לי [...] האם בשניהם אותה כמות
של חומר?"

טאימה: "כן."

[...]

אסיסטנטית: "את יודעת מה נעשה? נגיד שזו עכשיו עוגה, לא באמת, רק
כדי לשחק. לך יש עוגה אדומה ולי יש לבנה. אם נאכל אותן, נאכל שתינו
אותה כמות?"

טאימה: "כן."

אסיסטנטית: "טוב. ועכשיו תסתכלי. אני אקח את העוגה שלי ואעשה בה
משהו" [יוצרת מן הפלסטלינה צורת מוט] "מה זה?"

טאימה: "זה מקל."

אסיסטנטית: "מקל. עכשיו, מה את חושבת? אם אוכל את המקל הזה
ואת תאכלי את כדור הפלסטלינה, האם נאכל אותה כמות, או שלאחת
מאתנו יהיה יותר מה לאכול?"

טאימה: "לך יש יותר מה לאכול מאשר לי."

אסיסטנטית: "כן. מדוע?"
טאימה: "מפני שזה ארוך יותר."

[...]

אסיסטנטית: "ואם אעשה מזה שוב כדור [...] כמו שהיה בהתחלה, כמה יהיה לכל אחת מאתנו לאכול?"
טאימה: "אותו דבר."
אסיסטנטית: "שוב אותו דבר?"
טאימה: "כן."

(על פי ברינגייה, שם, עמ' 44-45)

לגבי נאדין בת החמש אין מתקיים חוק שימור החיילים, לגבי טאימה בת השש אין מתקיים חוק שימור כמות הפלסטלינה. מן הראוי, לדעתי, לציין: העובדה שכאשר מחזירים את החיילים או את גושי הפלסטלינה למצבם ההתחלתי שב ונתפס שוויון (בין מספר הירוקים לאדומים, בין כמויות החומר בשני כדורי הפלסטלינה) אינה מעידה על תפיסת השימור. מה שקורה כאן הוא שכשהמצב חוזר בדיוק לתנאי ההתחלה (או מקביל להם, בהמשך ניסוי החיילים שלא צוטט כאן), נעשית אותה הערכה (זיהוי השוויון) כמו שנעשתה מלכתחילה. אבל עובדה היא שבדרך, בעת שחל שינוי בפריסה המרחבית (פיזור החיילים האדומים, עיצוב הפלסטלינה כמוט מוארך), המספר או הכמות נתפסים כגדולים יותר. אין כאן שימור, אלא להפך: בכל מקרה יש פעמיים אי-שימור, פעם הגדלה בבחינת "יש מאין", ולאחר מכן הקטנה למצב ההתחלתי. משהו מעין ההתרחשויות שחוה אליס בארץ הפלאות כשהיא נוגסת לסירוגין משני צדיה של הפטרייה, הצד המגביה והצד המנמך. אי שימור הכמות.

וכך כותבים פיאז'ה ואינהלדר: "הסימן הברור ביותר לקיומה של תקופה טרום-אופראציונית [...] הוא היעדרם של רעיונות בדבר שימור עד גיל שבע או שמונה לערך [...] הניסוי העוסק בשימור נוזלים, אשר בו מוזגים את תוכן של כוס A לכוס צרה יותר B או לכוס רחבה יותר C. במיוחד ראויות לציין שתי עובדות בשפיטותיהם של בני ארבע עד שש, הסבורים שכמות הנוזל [בתהליך זה] גדלה או קטנה" (פיאז'ה ואינהלדר, 1984, עמ'

104). בהמשך הם טוענים כי לאחר שלב התגובות הטרומ-אופרציוניות של אי-שימור יש התפתחות בשלבים של תפיסת השימור הכמותי: בגיל 7-8 גוש חומר נתפס כמשתמר אף כשחלים שינויים בצורתו, בגיל 9-10 מגלה לטענתם הילד את שימור המשקל, ואילו שימור הנפח (הכוונה לנוזלים אי-דחיסים, כמובן; בגזים לא מתקיים כידוע שימור הנפח) נתפס בגיל 11-12; הכוונה, למשל, לכך שאם משקיעים בתוך מים הנתונים בכלי גוף כלשהו, כך שגובה המים בכלי עולה, הנער תופס שכמות המים לא השתנתה עקב כך. פיאזיה טוען כי ילד בן חמש מתרשם מאורכה של שורת החיילים, ואילו ילד בן שבע תופס שאם (בשפת הפיזיקה) "המערכת היא סגורה", דהיינו - שלא נוספו חיילים ולא נגרעו חיילים מלוח השולחן שעליו סודרו מלכתחילה, המספר נותר שווה, גם אם זה לא נראה כך מבחינה חזותית.

חוקרים מאוחרים יותר טוענים כי שיטות המחקר וההסקה של פיאזיה והאסכולה שלו גרמו לעתים להערכה נמוכה מדי (underestimation) של היכולות הקוגניטיביות של פעוטות וילדים. כפי שמתאר מרקמן (Markman, *Cognitive Psychology*, 11, 1979), אם שואלים ילדים בני חמש, הטוענים כי החיילים המרווחים רבים יותר מן הצפופים, אם **הצבאות**, הצבא הירוק והצבא האדום, שווים בגודלם, מקצתם יענו במקרה זה תשובה נכונה: הצבאות שווים בגודלם. המסקנה היא שכשהילד אינו רואה בחיילים אוסף פרטים אלא קבוצה, תפיסת השוויון משתפרת. חוקרים אחרים מדגישים את הסביבה התרבותית הספציפית של הילד ואת הידע שרכש, אם הוא רלוונטי לתחום השימור הספציפי. לפי תפיסה זו ילד יכול לזהות שימור בתחום אחד, שהוא מיטיב להכירו, ולא לזהותו בתחום אחר, תחום המופר לו פחות.

מכל מקום, לענייננו כאן אפשר לדעתי לסכם כי חוקי שימור יומיומיים ו"מובנים מאליהם" לאדם הבוגר, דוגמת מספר חיילי המשחק, כמות הפלסטלינה או נפח המים בכוס (כל עוד מדובר במערכות סגורות, דהיינו - שאין מוציאים או מוסיפים בהן רכיבים), אינם נתפסים אצל ילדים רכים.

ג. בדרך לשימור: מיתוסים, אגדות ילדים ושימור מהויות

שני חלקי המאמר הקודמים היו בבחינת הקדמה, הכנת הרקע. עתה, בחלק אחרון זה, אני מבקש להעלות את הטענה כי חוקי השימור

אחד הזכרונות הראשונים שלי: אבא לוקח אותי למסיבת בר מצווה בבית של מכר. אבא נוטל כוס ובה "מים", מוזג לתוכה מים מבקבוק ו... המים שבכוס הופכים לנוזל לבן, חלבי. מאוחר יותר למדתי כי כך מתנהג ערק כשיוצקים לתוכו מים.¹ ואולם בהיותי ילד נרעשתי להיווכח שמהו כאילו אינו תקין בעולם. כדיעבד אני יכול לומר לעצמי שהייתה טבועה בי איזו ציפייה ל"שימור השקיפות": מים שקופים אמורים להישאר שקופים אם מוסיפים להם עוד מים שקופים. התדהמה הייתה על שהופר "חוק השימור" האינטואיטיבי (ודאי שלא יכולתי לנסחו במילים או ב"נוסחה") "שקוף + שקוף = שקוף".

שנים מספר מאוחר יותר, בעודני ילד, עוד מעשה "פלא" הרשים אותי עמוקות, הפעם בתערוכה מדעית (בימים שלפני הטלוויזיה, קל וחומר הצבעונית): מכונה יצקה "מים" למבחנה שהכילה "מים". והנה בעקבות עירבוב נתקבלה תמיסה שצבעה ארגמן עז! מאוחר יותר למדתי את סוד ה"קסם": תמיסת האינדיקטור פְּנּוּל-פּתֶלַאין חסרת צבע. אם הופכים אותה לבסיסית, היא משנה את צבעה לארגמן עז. אין לי ספק שהרושם העז שנחרת בי נבע במידה רבה מתפיסה אינטואיטיבית בדבר קיומו של "חוק שימור הצבע", חוק שאינו מתקיים, כמובן, בעולם הפיזי: כאילו משהו חסר צבע אינו יכול להפוך למשהו צבעוני! כעין הנחה שצבע אינו יכול להיווצר בבחינת יש מאין, או במילים אחרות: הצבע (או: חוסר הצבע) נתפס בי בילדותי ככפוף לחוק שימור.

צמיחת האפון וצפחת השמן

עתה אני מבקש להעלות את הטענה שהפנימה (הנפש) האנושית מוכנה לקבל בקלות אי-שימור כמותי אם הוא בבחינת "עוד מאותו דבר", הרבה

¹ בשנת 2003 פרסמה איזבל גרילו דו"ח מחקר שעשתה בשיטות מתוחכמות ושנועד לפענח את המנגנון המדויק האחראי להפיכת משקה דוגמת ערק לנוזל לבן-חלבי בעקבות הוספת מים:

Isabelle Grillo, "Small-Angle Neutron Scattering Study of a World-Wide Known Emulsion: Le Pastis", *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*, 225 (2003), pp. 153-160.

עיקרו של דבר הוא קיומם של שלושה רכיבים בערק: מים, אלכוהול ואַגָּתֶל - שהוא חומר מסיס באלכוהול ובלתי מסיס במים.

הפיזיקליים, שהם חוקים כמותיים המבטאים את אופן התנהלות העולם הפיזי, לא נתגלו לתודעה האנושית, ל-mind (כאמור, הצעתי כבר בעבר את הביטוי העברי: פנימה, במלרע), בבחינת "יש מאין" גמור, אלא על רקע קיומה של איזו תפיסה אינטואיטיבית ולפיה "חייב להתקיים שימור" של דברים מסוימים בעולם. ואולם תפיסת השימור ה"טבעית" באדם היא - זו טענתי - תפיסת שימור של איזו איכות, איזו תכונה "פנימית", שימור של איזו מהות, ולא שימור כמותי נוסח הפיזיקה. יתר על כן, "חוקי שימור איכות/מהות" אלה אינם מתקיימים בעולם הממשי, אף שהתודעה שלנו מצפה שיתקיים שימור של איזו מהות פנימית, בלתי מתכלה, כעין עצם הלז. תפיסת שימור זו, שהיא הטבעה בנפשנו מילדות, היא במהותה חשיבה מאגית, הנוגעת ל"מהויות" ולא לגדלים פיזיים מדידים. נוסף על כך בכונתי להראות שבמיתוסים ובגרסאות מסוימות של אגדות ילדים אפשר למצוא רמזים לקיומה של ציפייה לשימור איכותי/מהותי.

למיתוסים שאזכיר בהמשך יש משמעויות פסיכולוגיות, חברתיות ותאולוגיות עמוקות; האגדות שאזכיר רוויות במטענים פסיכולוגיים מודעים ובלתי מודעים - ברוננו בטלהיים העמיק לעסוק בהן בהקשר הפרוידיאני בספרו "קסמן של אגדות" (בטלהיים, תש"ס); ואולם כאן לא אעסוק בכך כלל, גם לא בהתחקות אחרי גלגולי מוטיבים של מיתוסים וגרסאות של אגדות - אדון בהם רק מהיבט אופי השימור שמובע בהם.

במיתוסים, באגדות, בסיפורי נסים, הסיפור אמור להתקבל על דעתם של הקוראים או המאזינים. לפיכך, הגם שמתוארים דברים מופלאים, יש במקביל ניסיון לצמצם את הגורמים שהתודעה האנושית מתקשה לעכלם. בסיפורי נס ופלא קיים אפוא מתח בין שמירה על חוקי שימור (אמתיים או לא אמתיים) לשבירתם של חוקי שימור. החוקים הנשברים הם בדרך כלל חוקי שימור כמותיים, ושבירה זו היא שהופכת את המאורע לנס, ואילו חוקי השימור המתקיימים בהם, לצורך הבטחת האמון של הקורא או המאזין, הם פעמים רבות חוקים שבפועל אינם מתקיימים בעולם. מדובר, כאמור, בשימור של איזו תכונה איכותית, מהותית, "זוהות פנימית", האופיינית למחשבה מאגית.

יותר ממוכנותה לקבל הופעת "יש מאין". דבר זה מחדד את ההבדל שבין התפיסה האינטואיטיבית, ה"טבעית", בדבר שימור של מהות כלשהי, לבין מה שעלינו לשכנע עצמנו במחקר מכוון, ולעתים בדרך חתחתים (כסיפירו של חוק שימור האנרגיה) ומתוך מאמץ אינטלקטואלי - שימור כמותי. פעמים רבות מוצג תהליך שבו מופיע "עוד מאותו דבר" כנס אמנם, אבל כעין נס "מתקבל על הדעת", נס שלא ממש שובר את הכלים. אכן, כלים: הנס הכמותי של כד הקמח וצפחת השמן של האשה מצרפת שעשה אליהו (מלכים א' יז, ח-טז) ונס אסוך השמן והכלים השאלים שעשה אלישע: "ואשה אחת מנשי בני הנביאים צעקה אל אלישע [...] ויאמר אליה אלישע, מה אעשה לך, הגידי לי, מה יש לך) בבית; ותאמר, אין לשפחתך כל בבית כי אם אסוך שמן. ויאמר, לך כלי מן החוץ, מאת כל שכניכי (שכניך), כלים רקים, אל תמעטי. ובאת וסגרת הדלת בעדך ובעד בניך, ויצקת על כל הכלים האלה, והמלא תסיעי. ותלך מאתו, ותסגר הדלת בעדה ובעד בניה; הם מגישים אליה, והיא מיצקת (מוצקת). והי כמלאת הכלים, ותאמר אל בנה הגישה אלי עוד כלי, ויאמר אליה, אין עוד כלי; ויעמד השמן" (מלכים ב' ד, א-ו).

"עוד מאותו דבר" הוא גם נס חנוכה, נס פך השמן: "וכשגברו ישראל על אויביהם ואיבדום, בחמישה ועשרים בחודש כסלו היה. ונכנסו להיכל, ולא מצאו שמן טהור אלא פך אחד; ולא היה בו להדליק אלא יום אחד בלבד, והדליקו ממנו נרות המערכה שמונה ימים - עד שכתשו זיתים, והוציאו שמן טהור" (משנה תורה - ספר זמנים, הלכות מגילה וחנוכה, פרק ג, ב).

מבחינה פיזיקלית תוספת של מיליגרם אחד למאה קילוגרמים של אותו חומר אינה שונה מהופעת מיליגרם אחד בבחינת "יש מאין" גמור. אך לא כך רואה זאת התודעה האנושית; תוספת של "אותו דבר" נראית טבעית הרבה יותר. דבר זה מובן על רקע הניסיון הימיומי, למשל של עובד האדמה: הוא זורע זרע של חיטה (או אפון) באדמה, וממנו מתפתח צמח חיטה (או אפון) גדול המניב "מאה שערים". העובדה שחלק ניכר מתוספת המסה מקורה גז בלתי נראה שבאוויר (CO_2), הנקלט בצמח דרך העלים והופך לחומרים אורגניים בתהליך הפוטוסינתזה) ודאי שאינה מובנת מאליה; הוכחתה דרשה עריכה מתוכננת של ניסויים מתוחכמים למדי. ואולם

ברור היה לעובד האדמה כי מזרע חיטה יצמח צמח חיטה - על פי מראה העיניים והניסיון הימיומי הכמות איננה נשמרת אפוא, אך איזו מהות, איזו זהות פנימית, בהחלט נשמרת.

בהקשר זה ראוי לבחון את האגדה "גיק וגבעול השעועית", או על פי גרסתו של אוריאל אופק "אפון הפלא" (אופק, תשל"ט). זרע השעועית (או האפון) הפלאי נובט ובמהלך לילה אחד הופך לצמח ענק המגיע השמימה, או לפסגת הר. לכאורה, אין בכך משום הפרה של חוקי שימור פיזיקליים, שהרי שני הדברים החריגים בצמיחת השעועית (אפון) הם לוח הזמנים הצפוף (בתוך שעות אחדות) והממדים הכבירים של הצמח. פרט להם מדובר, לכאורה, בתהליך טבעי לחלוטין: צמחים כרגיל נובטים וצומחים ומגביהים. ואולם מועד הצמיחה הוא ההופך אגדה זו לסותרת חוק שימור: כדי לגדול נדרשת לצמח תוספת חומרים אורגניים, ויצירתם בפוטוסינתזה תלויה באור, אור השמש. אם הצמיחה נעשית בלילה מופר חוק שימור האנרגייה (ולא חוק שימור החומר, שהרי נבטים וצמחים אכן קולטים חומרים מן הסביבה וגדלים על חשבונם), משום שלחומרים האורגניים המרכיבים יצורים חיים, ובכללם צמחים, תכולת אנרגייה כימית גבוהה מזו של החומרים שהצמח סופג (באמצעות השורש והעלים) כחומרי גלם מן הסביבה - תוספת האנרגייה מקורה באור שנקלט בצמח.

נס כמותי בבחינת "עוד מאותו דבר" מיוחס גם לישוע, נס הלחם והדגים, למשל לפי גרסת יוחנן: "וישא ישוע את עיניו וירא עם רב בא אליו ויאמר אל פילפוס מאין נקנה להם לחם לאכל [...] ויאמר אליו אחד מתלמידיו [...] יש פה נער אשר לו חמש ככרות לחם שערים ושני דגים אך אלה מה המה לעם רב כזה. ויאמר ישוע צוו את העם לשבת [...] וישבו לארץ כחמשת אלפי איש במספר. ויקח ישוע את ככרות הלחם ויברך ויתן לתלמידיו והתלמידים אל המסבים וככה גם מן הדגים כאוות נפשם. ויהי כאשר שבעו ויאמר אל תלמידיו אספו את פתותי לחם הנותרים למען לא יאבד מאומה. ויאספו וימלאו שנים עשר סלים בפתותי חמש ככרות לחם השערים הנותרים לאכליהם" (יוחנן, ו' 5-13). כדאי לשים לב למתח הלוגי שבין "הקלות הבלתי נסבלת" של הדילוג על משוכת חוק שימור החומר לבין הטרחה שבאיסוף הפיזורים שנותרו... מבחינת הפיזיקה, הנס הכמותי המסופר היה על-טבעי באותה מידה אם "חומר הגלם" להשבעת 5,000

איש לא היה חמש ככרות לחם אלא גבעול קש בודד, מעט אוויר או אֵין מוחלט. ואולם כשחומר המוצָא הוא מזון, ובמיוחד כשיש התאמה מספרית בינו לבין קהל הרעבים (חמש לחמשת אלפים), העובדה שמתקיים חוק השימור המאגי, "חוק שימור המהות" (מזון), מקנה לסיפור אמינות בתודעת המאזינים; כך נותר בשיווי משקל עדין המתח שבין הנסי לבין המתקבל על הדעת.

היפה, החיה והמחליא

הנפש האנושית נוקבת בשמות לדברים: זה הר, זה עכבר; זה לחם וזה שמן. ומאחר שקיימת מלה, רואה בה התודעה האנושית מושא קונקרטי, הכפוף ל"חוקי שימור" מאגיים. נדמה שאחת הדוגמאות האוניברסליות לכך הוא המושג "נשמה". לא ארחיב כאן בעניין זה; עמדתי על כך בחיבורים אחרים. מכל מקום, לאחר שנוצק המושג "נשמה" (שנדמה כי הוא נתפס כישות חסרת ממדים כמותיים: האם יכולה להתקיים נשמה וחצי? 3/4 נשמה!), הוא נתפס כמהות נשמרת. כאמור, לא ארחיב בעניין זה, אסתפק רק בכך שלשימור הנשמה יש - נוסף על הציפייה הכללית בדבר "שימור", שהיא הנושא של מאמר זה - מקור נוסף, ייחודי: הקושי הפסיכולוגי להיפרד סופית מאנשים קרובים שהלכו לעולמם (שימו לב לביטוי: הם לא נהפכו לאֵין, אלא הלכו לעולם אחר!), ובמיוחד חוסר האפשרות להפנים את התאיינות האני בסיום החיים, במוות. המושג "נשמה" נוצר מבחינה פסיכולוגית מלכתחילה, כך נראה, כדי שאפשר יהיה להחיל עליו חוק שימור...

כאן יש להודות: נראה שגם המושג "אנרגייה" יש בו ולו מעט מיסוד המאגיה. שהרי אנרגייה היא דבר מה חמקמק (כזכור, ארתור אדינגטון טען שהיא חומקת אפילו מהגדרה ברורה). אך לאחר שנוצק המונח, קל יותר לחשוב על אנרגייה כעל משהו שמשתמר. ובכן, המושגים הפיזיקליים, גם להם יש לעתים פסיכולוגיה משל עצמם...

אך נחזור ל"חוק שימור הזהות הפנימית". נדמה שאפשר למצוא לו ביטוי מקסים באגדה "היפה והחיה". בעקבות כישוף שהוטל על הנסיך הוא הפך למפלצת, ואילו אנשי הטירה, המשרתים, הפכו לכלי בית, לחפצים

מדברים. והנה, בהיפוך שחל בעקבות הכישוף - היפוך שבו מופר במפורש חוק שימור החומר - משתמרות מהויות איכותיות: יכולת המחשבה והדיבור, וכן מהות תפקודית: החפץ שאליו התגלגל כל משרת מבטא בבירור את מהות תפקידו.

נדמה לי כי חשיבה מאגית בדבר שימור של איזו מהות היא המניע לאחד הפשעים המזוויעים, המחרידים ביותר, המתרחשים בתקופתנו: דווח כי במקומות מסוימים בעולם חולי איידס אונסים תינוקות או ילדות קטנות מתוך אמונה שבכך יירפאו. איך קשורים חוקי שימור לזוועה מצמררת זו? המחשבה המאגית המונחת, לדעתי, בבסיס המעשה המזועזע היא "חוק שימור המחלה" - אם המחלה שלי תעבור למישהו אחר, בי היא כבר לא תהיה. מחשבה מקבילה, אף שתוצאתה פחות נפשעת, היא לדעתי הבסיס למנהג הרווח בכמה מקהילות ישראל להשתמש ביונה כדי להירפא ממחלת הצהבת: מחזיקים את היונה על בטנו של החולה או בקרבנו, המחלה "נשאבת" מגוף החולה לגופה של היונה, היונה מתה והחולה מחלים, בבחינת "חוק שימור המחלה".

אדם, חווה, עפר

דרגה אחת גבוהה יותר של נס מדרגת "עוד מאותו דבר" היא יצירת יותר אך לא בדיוק מאותו דבר, אלא ממהו מקביל, מ"חומר גלם" שדומה באיזושהי מהות או תכונה ל"תוצר הנס". כך, למשל, מתוארת בריאת האשה בבראשית פרק ב': "ויפל ה' אלהים תרדמה על האדם ויישן; ויקח אחת מצלעתיו ויסגר בשר תחתנה. ויבן ה' אלהים את הצלע אשר לקח מן האדם לאשה ויבאה אל האדם" (בראשית ב, כא-כב). ודאי שלעובדה שהאישה נבראת מצלעו של אדם, ולשאר פרטי ההתרחשות, יש משמעויות עמוקות מאוד מבחינה סוציולוגית, דתית, כלכלית, מבחינת הפסיכולוגיה של המשכיה המינית ועוד. אך כאמור כאן לא אעסוק בכך; אני רק מבקש להראות שסיפור זה בא גם לענות על איזו תחושה אנושית שיש להתחיל ממהו, לא מאין גמור. ברור שאין כאן שימור כמותי, אך יש כאן שימור של "משהו", של גוף אנושי. אכן, קל יותר - כך נראה - לתודעה האנושית להאמין במאורע "משהו הופך למשהו אחר, דומה במקצת, ולו גדול יותר" מאשר במאורע "אין הופך למשהו".

לדרגה זו של שימור ניתן לייחס גם את עצם הלז, שממנה, על פי האמונה היהודית, יקום האדם לתחייה בעת תחיית המתים. שהרי יש בעיה: כיצד ייתכן שהגוף שנרקב וכלה הוא עצמו יקום לתחייה? "אמר לו [לרבי יהושע בן חנניה]: מהיכן הקבי"ה מציץ את האדם לעתיד לבא [מציץ מלשון ויצץ ציץ]? אמר לו מלז של שדרה. אמר לו: מנין אתה יודע? אמר לו [...] טחנו בריחיים ולא נטחן, שרפו באש ולא נשרף, נתנו במים ולא נמחה [...]!" (על פי בראשית רבה כח, ג). וכך, יש גורסים, בעת תחיית המתים תשמש עצם הלז כעין שאור שבעיסה, וממנה ייבנה מחדש הגוף כולו. לפי גרסה זו, מאחר שהגוף ייבנה, כעוף החול, משריד הגוף הקודם, הרי שזה בעצם אותו הגוף, ומכאן שהמת עצמו הוא שקם לתחייה.

עוד מדרגה של פער בין טיב חומר הגלם לתוצר הנס נמצא בסיפור בריאת האדם על פי הנוסח של בראשית ב' 7: "וייצר ה' אלהים את האדם עפר מן האדמה, ויפח באפיו נשמת חיים". ודאי שגם במקרה זה לעובדה שהאדם נברא מעפר יש משמעויות עמוקות, מוסריות, פילוסופיות ודתיות. אך גם כאן אני מבקש להצביע על קלות יחסית שבה הפנימה, הנפש, האנושית מקבלת הפיכת עפר לאדם לעומת יצירת אדם יש מאין. במיוחד כך מפני שאדם - ולפחות בשרו (העצמות, כבר נוכחנו, עמידות יותר...) - מתגלגל לעפר לאחר מותו וקבורתו. שהרי על פי הפיזיקה של הבריאה כפי שהיא מתוארת בפרק א' בבראשית, מי שבורא את כל היקום בבחינת יש מאין גמור, במאמר בלבד, ודאי שאינו זקוק למעט עפר כחומר גלם לבריאת אדם. יצירה של אדם - או כעין אדם - מגוש חומר מתוארת גם באגדה שנטוטה סביב דמותו של רבי יהודה ליווא, המהר"ל (מורנו הרב ליווא) מפראג, בן המאה ה-16. האגדה מספרת שהמהר"ל יצר את "הגולם" מבוץ שאסף עם תלמידיו בגדה של הוולדבה. כך גם הנגר "הזקן והטוב" גיפטו מגלף את פינקויו בעץ.

תנינים, עכברים וסוסים

ידועים נסים אחרים שבהם נהפך "חומר גלם" למשהו אחר (ולא לאדם), משהו שיש לו איזו תכונה משותפת לחומר הגלם, אך מתוך הפרה ברורה של חוק שימור החומר. ושוב: נראה כי יציאה מ"משהו" (ולא מאין), קל וחומר משהו שלו תכונה משותפת לתוצר הנס, די בה לסבר את הפנימה

(הנפש) האנושית, לצמצם את המתח שבין הנסי למצופה עד לרמה שיתקבל על הדעת. אפשר להבחין בכך בנס הפיכת המטות לתנינים: "וישלך אהרן את מטהו לפני פרעה ולפני עבדיו ויהי לתנין. ויקרא גם פרעה לחכמים ולמכשפים [...] וישליכו איש מטהו, ויהיו לתנינים; ויבלע מטה אהרן את מטתם" (שמות ז, י"ב). ראוי לתת את הדעת שהפיכת המטה לחיה המאורכת תנין אינה מתוארת כנס מאוד חריג, שהרי גם אנשיו של פרעה הצליחו בכך...

מרשימה עוד יותר - הן מבחינה כמותית הן מבחינת חוט הדמיון שבין "חומר הגלם" לבין תוצר הנס - היא מכת השחין: "ויאמר ה' אל משה ואל אהרן, קחו לכם מלא חפניכם פיח כבשן, וזרקו משה השמימה לעיני פרעה. והיה לאבק על כל ארץ מצרים; והיה על האדם ועל הבהמה לשחין פרח אבעבעת בכל ארץ מצרים. ויקחו את פיח הכבשן, ויעמדו לפני פרעה, ויזרק אתו משה השמימה; ויהי שחין אבעבעת פרח באדם ובבהמה" (שמות ט, ח"ג).

ולבסוף, בבחינת אחרונה חביבה, "האגדה הידועה וכנראה גם החביבה ביותר" - כפי שמצטט ברוננו בטלהיים ממילון הפולקלור של פנק ווגנלס (Funk and Wagnalls, 1950) - האגדה סינדרלה (או: לכלוכית). כאן אעסוק בגרסאות של שארל פרו ושל אולפני דיסני. "אך נגעה הפיה במקל הקסמים שבידה בדלעת, וראה זה פלא: לא דלעת היתה מוטלת לפניו, אלא מרכבת פאר. אחר כך הפכה הפיה ששה עכברים קטנים לשישה סוסים אבירים, ועכברוש גדול - לרכב, בעל שפם גדול ומגפיים גבוהים לרגליו" (פרו, 1966). שימור כמותי? - כלל וכלל לא. אבל מבחינה פסיכולוגית אין כאן יש מאין, וכן מתקיימים כאן כללי שימור ברורים: הדלעת החלולה דומה בחיצוניותה במידת מה לכרכרה - הפיה לא ביקשה, למשל, קלח תירס, אלא במפורש דלעת. ויש כאן שימור המספר - שישה עכברים הפכו לשישה סוסים, וחולדה אחת - לרכב יחיד, המתפאר בשפם חולדתי. בעלי חיים נותרים בעלי חיים (ובמאמר מוסגר: היפוך בעלי חיים לבני אדם - חולדה לרֶבֶב, צפרדע לנסיך או ברבור לנסיכה - ולהפך, היפוך כזה הוא כמעט בבחינת "מובן מאליו" באגדות ובסיפורי ילדים; מובן שבהיפוכים אלה חוק שימור המסה אינו תקף) ורק הדלעת, שהיא צמחית, הופכת למשהו שאיננו חי, לכרכרה. אמנם, פיה המפרה את חוקי שימור החומר מתוך הקפדה על שמירת "חוקי שימור איכותיים" אינה נמצאת כלל בגרסת האחים גרים

גרים, תשל"ט). כאמור, במאמר זה איננו עוסקים כלל בהיבטים השוואתיים הנוגעים לגרסאות שונות (רבות מאוד!) של אגדה זו, כמו גם אגדות אחרות. ובכל זאת שתי הערות בהקשר זה: ראשית, בגרסת האחים גרים אין מובאת סיבה ברורה (כמו הוראת הפיה בגרסת פרו) מדוע על סינדרלה לנטוש בבחילות בחצות הלילה; לעומת זאת אצל פרו הפיה מציגה מראש לפני סינדרלה את הנטישה בחצות כדרישה אולטימטיבית, וכך הסיפור מסתבר יותר. ושנית, הערה מעט צינית: בגרסה של הוצאת מי מזרחי ממלאת הפיה תפקיד מרכזי בטקסט, אבל בציורים היא פשוט איננה קיימת, ובמקומה מופיע קבר האם, השייך בכלל לגרסת האחים גרים. אכן תעלומה היא, ולעולם המולוויית העברי פתרונים... ומכל מקום ששת העכברים ההופכים לשישה סוסים ב"לכלוכית" של פרו הם שעוררו את תשומת לבי לחוקי השימור המיוחדים שבאגדות ילדים, ולאפשרות של קיום תפיסת שימור קדם-כמותית בילדים ובהיסטוריה האנושית.

סיכום

הפיזיקה מושתתת על חוקי שימור כמותיים - גדלים מסוימים נשמרים קבועים בתנאים מוגדרים, גם באותם תהליכים שבהם מתחוללים שינויים עמוקים רבים בתכונות. חוקי שימור כמותיים אלה אינם מובנים מאליהם לתודעה האנושית. ואולם ניסיתי להראות שבפנימה האנושית אכן טבוע מושג השימור, ובנפשנו יש מעין ציפייה לשימור של דברים, כבר בגיל הילדות, וגם בתרבות הקדם-מדעית. פעמים רבות מדובר בציפייה להשמרות של תכונות, מהויות, או זהויות-פנימיות, שבעולם הממשי במפורש אינן משתמרות. טענתי היא אפוא שתפיסת השימור טבועה באופן טבעי בתפיסה האנושית, אלא שבאופן טבעי אין היא מכוונת לתכונות ה"נכונות" (כמויות של אנרגייה, מסה, תנע, מטען וכד'), אלא דווקא כלפי תכונות שהמחקר מדעי מגלה שאינן משתמרות (סוג החומר, מהות התפקיד או האופי, וכד'). ניסיתי להראות שאפשר להיווכח ממיתוסים, ממאגיה ומגרסאות מסוימות של אגדות ילדים בקיום בסיסי של מושג השימור בתודעה האנושית. עצם קיומו של מושג השימור בפנימה האנושית, אף אם אין זה השימור הכמותי שפוענח על ידי הפיזיקה, יכול היה להוות תשתית שאפשרה את ההישג האינטלקטואלי של פיענוח חוקי השימור הפיזיקליים הכמותיים, שהם הבסיס להבנתנו את העולם הפיזי.

ביבליוגרפיה

לחלק א'

- דותן, פליקס (תשס"א), אל הנוכבים - מאטומים עד חורים שחורים, מאגנס (סדרת מדע).
טריינין, אבנר (בדפוס), יסודות התרמודינמיקה - ממנוע הקיטור לחוקי היסוד של הטבע, הקיבוץ המאוחד.
נאמן, יובל וקירש, יורם (1983), צידי החלקיקים - החיפוש אחר חלקיקי היסוד של החומר, מסדה.

Hewitt, Paul G. (1993), *Conceptual Physics*, 7th ed., Harper Collins.
Kaufmann, William J. III (1993), *Discovering the Universe*, 3rd ed., W. H. Freeman.

לחלק ב'

- ברינגייה, זיאן-קלוד (1988), הלמידה האנושית - שיחות עם פיזיקאים, עברית: דוד ניב, כתר.
פיזיקאים, זיאן ואינהלדר, בארבל (1984), הפסיכולוגיה של הילד, עברית: יונה שטרנברג, ספרית פועלים.
קרול, לואיס (1997), הרפתקאות אליס בארץ הפלאות, עברית: רנה ליטוין, הספריה החדשה / הקיבוץ המאוחד.

Markman E. M. (1979), "Classes and collections: Conceptual organization and numerical abilities", *Cognitive Psychology* 11, 393 – 411.

Smith, Nolen-Hoeksema & Fredrickson, Loftus (2003), *Atkinson & Hilgard's Introduction to Psychology*, 14th ed., Thomson/Wadsworth.

לחלק ג'

- אופק, אוריאל (תשל"ט), אפון הפלא - בעקבות אנדה עתיקה, זמורה ביתן מודן.

בטלהיים, ברונו (תש"ס), **קסמן של אגדות**, עברית: נורית שליפמן, רשפים.
גרים (האחים) (תשל"ט), **אגדות**, ליקט ותרגם: דב קמחי, יהושע
אורנשטיין / יבנה.

גרים (האחים) (תשנ"ג), **הענק והחית ועוד 33 אגדות אחרות**, עברית:
חנה לבנת, מחברות לספרות.

דיסני, וולט (תשל"ה), **סינדרלה**, מהדורה שנייה, עברית: ענבה קנטור,
יבנה.

דיסני, וולט (תשמ"ו), **פינוקיו**, עברית: שולמית לפיד, יהושע אורנשטיין /
יבנה.

דיסני, וולט (1992), **היפה והחיה**, עברית: שפיררה זכאי, כנרת.
פרו, שארל (1966), **לכלוכית**, עברית: ורה ישראלית, מ' מזרחי.

