

גיליון 120 | אוגוסט 2008
כתב-עת למדע ולמחשבה

גליליאן



כמו חיפושית המקיפה חבל:
בחיפוש אחר ממדים קטנים וסגורים

לוטו: לא רק מזל
לשפוך אור (לייזר) על אטומים קרים



מחיר 38.00 ש"ח (באילת 32.90 ש"ח)



ifeel
www.ifeel.co.il



ד"ר חני זוד, אנגלית
מחקר בין לשוני של סימון יחסה חריג (ECM)

ד"ר הראל זרון, פילוסופיה יהודית
בין שמרנות לרדיקליות בהשקפת עולמו, בהגותו ובפועלו של "הרבנים החדשים" בציונות הדתית

ד"ר שושנה דה לה פואנטה, לימודי מידע
השפעותיהם של מסוגלות עצמית לחיפוש עבודה, מסוגלות עצמית לשימוש באינטרנט ותמיכה חברתית על חיפוש עבודה באמצעות האינטרנט בקרב מובטלים בישראל

ד"ר טלי וולף, פילוסופיה כללית
החיפוש אחר משמעות בהגותו של היידגר והויה כמקום מפלט

ד"ר שרה וידנפלד, מוסיקה
המסורת המוסיקלית של הרב שלמה קרליבך בין שנים 1950-2005 בהקשרה התרבותי

ד"ר אריק זימרמן, לימודי מידע
היחס בין שימוש בדואר אלקטרוני ופריון מחקר בקרב הסגל האקדמי הבכיר באוניברסיטת מחקרית

ד"ר איריס חי, לימודי מידע
דפוסי איתור מידע ואחזורו של סטודנטים בני מיעוטים הלומדים לתואר ראשון במכללה

ד"ר אתי יערי, לימודי מידע
הערכה ממוכנת של איכות המידע במערכות וויקי: מחקר משתמש

ד"ר דקלה כהן, ערבית
אסלאם ומאבק אלים בכתביו של הד"ר פתחי אלשאקא, מנהיג הג'האד האסלאמי בפלסטין

ד"ר גולן כרמי, לימודי מידע
למידה בסביבה מתקשבת כמתייבת נטיות חשיבה אינטלקטואליות

ד"ר אלמוג כשר, ערבית
ה - ظرف בתאוריה הדקדוקית הערבית של ימי הביניים

ד"ר אליסה לוי, אנגלית
לקראת גישה מאוחדת לסמנטיקה של "any"

ד"ר לימור לוי בן-שושן, ספרות משווה
נשים ושבירת המוסכמות שבשתיקה: מן ה-Le Roman de Silence בצרפת של ימי-הביניים לסלונקי הקורטואזאנות המוכוזבת ברנסנס האיטלקי

ד"ר צבי לשם, פילוסופיה יהודית
בין משיחיות לבואה: החסידות על פי האדמו"ר מפיאסנא

ד"ר רוזה מץ (טורסקוב), מוסיקה
"מוסיקת עולם" בהקשרים מקומיים ובמערב: עיון ביצירתם של ארבעה מוסיקאים

ד"ר אמיר משיה, פילוסופיה יהודית
מחשבת ההלכה במשנתו של הרב שלמה זלמן אוירבך

ד"ר אברהם סגל, פילוסופיה יהודית
'ועל דרך העבודה...' 'עטרת צבי' לר' צבי הירש מזידיטשוב - פירוש לוריאני חסידי לזוהר

ד"ר דליה פדילה, אנגלית
דרכים בקריאת ספרות ערבית אמריקאית: מבוא לספרות שנכתבה על ידי ערבים באמריקה

ד"ר לין פורת, לימודי מידע
השאלה בין-ספרייתית והמחקר האקדמי: ההבדלים בין חוקרים המשתמשים ואלה שאינם משתמשים בהשאלה בין-ספרייתית והגורמים המשפיעים על תוצאות משביעות רצון

ד"ר נועה פינק-שמיט, לימודי מידע
תהליך הערכת איכות המידע במהלך איסוף מידע מה-Web

ד"ר ארנון פלטי, מוסיקה
נקודות החיבור בניבי הג'אז: תהליך המטמורפוזה ההרמונית

ד"ר מילי פרי-זורנו, לימודי מידע
ניהול ידע כמכוננים לניהול שינויים טכנולוגיים כלל-ארגוניים באוניברסיטאות בישראל

ד"ר ציפורה שרו קוה, ספרות משווה
ה'אחר' במחוזות נבחרים של טנסי ויליאמס: היבטים פילוסופיים ותיאולוגיים

ד"ר אירינה רבינוביץ, אנגלית
לפצות את מרים: ניתוח דמותן של אומניות יהודיות במאה ה-19 (דרך עדשה חברתית-היסטורית ותרבותית)

ד"ר רחל רבינוביץ, לימודי מידע
שירותי הספרייה הציבורית בישראל לישראלים אתיופיים ולישראלים רוסים

ד"ר דורית רובינשטיין, פילוסופיה כללית
הסבל ומעמד השקיפות של מטופל המצוי בשלב שיטיון מתקדם

ד"ר סוזן רוסיק, אנגלית
מחקר בין לשוני של לקויות קריאה בקרב מבוגרים דוברי עברית כשפת אם הלומדים אנגלית כשפה זרה

ד"ר מאור שביט, פילוסופיה כללית
אקלים האמונה על פי סרן קירקגור קונקרטיזם אנושית, שמזמנת את פעולת האמונה

ד"ר שרון שטרית-ששון, ערבית
רק על עצמי לספר ידעתי?! עיצוב הזהות האישית והקולקטיבית בראי הכתיבה האוטוביוגרפית של היצירות הפלסטיות פדוא טוקאן וסחר ח'ליפה

ד"ר גתית שמעון, ספרות משווה
השיפוט המוסרי ביצירותיהם הספרותיות של אנטון צ'כוב ואו. הנרי

ד"ר משה שמש, לימודי מידע
אבחון מודל הפרסונליזציה הרצוי למשתמשי ספריה דיגיטלית המיועדת לסטודנטים בבית ספר לסייעוד

ד"ר דגנית שרון, פילוסופיה כללית
קונפליקטים בין דרישות האתיקה המקצועית של הרפואה והסיעוד ניתוח לאור יסודותיו העקרוניים של 'המוסר המקצועי'

ד"ר מיכל אוסטרליץ, פסיכולוגיה
תרומות המיינויות לניהול קונפליקטים בזוגיות- התפקיד הממזן של דפוסי ההתקשרות

ד"ר עדנה אור, חינוך
משחקי-כאילו, גם אצל תינוקות? ניצני ההתפתחות של משחקי-כאילו אצל תינוקות

ד"ר מירב אלוש-לברון, מדעי המדינה
על סף המזרח שאלה של זהות בסרטי דור שני-שלישי 1990-2007

ד"ר לימור אלקלעי, מדעי המדינה
השתקפות תרבויות משנה בקריקטורה הפוליטית בעיתונות העברית

ד"ר דקלה אנדר-פוקס, פסיכולוגיה
השפעת מדדי דמיון ושונות של הגירויים ברקע בהשוואה לגירוי המטרה על אפקט הקשר במשימת זיהוי

ד"ר ליהי בלסון-חמל, פסיכולוגיה
מנטליזציה ביחסים זוגיים: תרומתם של יכולת רפלקטיבית, סגנון התקשרות, ויסות רגשי וייחוסים לאיכות הקשר הזוגי

ד"ר בתיה בן הדור, מינהל עסקים
הון חברתי בארגונים והשלכותיו על הפרט בעבודה

ד"ר יפעת בן חיי-שגב, מדעי המדינה
מזרחים בישראל מדברים על תכניות טלוויזיה המשודרות בזמן צפיית שיא- מחקר קהל

ד"ר ענת בן פורת, עבודה סוציאלית
מטפלים באלימות במשפחה: תרומת המשאבים האישיים, החברתיים והארגוניים לתחושת הקומפוטנטיות בתפקיד, טראומטיזציה משנית וצמיחה

ד"ר דורית בר (לנט), חינוך
השפעה של הוראה המשלבת מודלים ויזואליים דינאמיים או סטטיים, על פיתוח רמות הבנה בכימיה בנושא "פולימרים סינתטיים"

ד"ר אוהד בר-דוד, פסיכולוגיה
למידת רצף: מטלה אחת, מרכיבים שונים ומיומנויות שונות

ד"ר ענת בר-כהן, גאוגרפיה וסביבה
הליך החקיקה של חוק התכנון והבנייה תשכ"ה - 1965 בהקשרם של "מוסדות התכנון" (פרק ב' לחוק) ו"תוכניות" (פרק ג' לחוק)

ד"ר אורלי גולובטי, קרימינולוגיה
יחסי גומלין בין רפואה ראשונית לבין בריאות הנפש

ד"ר רותי גפני, מינהל עסקים
מתודולוגיה למדידת איכות של מערכות מידע נידודת-אלחוטיות

ד"ר אברהם גור, מדעי המדינה
הטיה בתקשורת: מסגרת למחקר ויישומה - התקשורת הישראלית ותהליך אוסלו 1994-2004

ד"ר אורלי דביר, קרימינולוגיה
חוללות עצמית ותמיכת עמיתים, שחיקה וטראומה משנית בסביבת עבודה רווית תחושת לחץ בקרב צוותים בפנימיית לילדים ולנוער בסיכון

235 מקבלי תואר דוקטור לפילוסופיה לשנת תשס"ח

- ד"ר יוני אביב, תולדות ישראל**
אב"א אחימאיר והרביזיונים המקסימליסטי בתנועה הרביזיוניסטית
- ד"ר נעם אבן, יהדות זמננו**
יחס מוסדות השלטון והחברה לאזרחים חללי פעולות איבה וטרור, ישראל כמקרה מבחן (1970-2000)
- ד"ר יעקב אברבנאל, ספרות עם ישראל**
שירת דוד אבידן המוקדמת (1950-1954)
- ד"ר רננה אילן, לימודי ארץ ישראל וארכיאולוגיה**
תולדות הישוב באזורי הפריפריה של ארץ ישראל בין התקופה ההלניסטית לתקופה הביזאנטית
- ד"ר חנוך באזוב, לימודי מזרח תיכון**
היחסים בין ברית המועצות לבין ישראל בשנים 1968-1985
- ד"ר יוסי בורדוביץ, לימודי ארץ ישראל וארכיאולוגיה**
הישוב הנוצרי בדרום הר חברון בתקופה הביזאנטית לאור החפירות בחורבת יתיר
- ד"ר יהודה א. בלנגה, לימודי המזרח התיכון**
נשרים בשמי המזרח-התיכון יחסי מצרים-ישראל הברית בתקופת ניקסון עד ערב מלחמת יום- הכיפורים 1969-1973
- ד"ר יוסי בן טולילה, תולדות ישראל**
הגירת יהודי תיטואן וטנג'יר לישראל, לספרד, לקנדה ולוונצואלה במאה העשרים
- ד"ר מתניה יוסף בן-גדליה, תלמוד**
חכמי ספיר בימי גזרות תתנ"ו ולאחריה: קורותיהם, דרכם בהנהגת הציבור ויצירתם הרוחנית בשלהי המאה ה-11 ובראשית המאה ה-12
- ד"ר אייל ברוך, לימודי ארץ ישראל וארכיאולוגיה**
בית המגורים בארץ-ישראל בתקופה הרומית: תרבות חומרית ומבנה חברתי
- ד"ר אמנון ברוק, לשון עברית ולשונות שמיות**
תחביר הפרוזה האוגריתית
- ד"ר נאה גוטמן, תנ"ך**
בינו לבניה בסיפור המקראי והשוואה לספרות היצרנית של בית שני
- ד"ר חיים גולובניץ, לימודי המזרח התיכון**
יחסי גומלין בין מדינות במזרח התיכון בתחומי הנשק הלא קונבנציונאלי, בין השנים 1971-2001
- ד"ר רינת גולן, לשון עברית ולשונות שמיות**
רכישה פורמלית ובלתי פורמלית של השפה העברית בקרב עולים חדשים מחבר העמים והשפעתה על קליטתם החברתית והתרבותית
- ד"ר גד גזבר, תלמוד**
לדרכו ההלכתית ופרשנותו התלמודית של המהר"ל מפראג
- ד"ר ענת גרנית-כהן, לימודי ארץ ישראל וארכיאולוגיה**
אשה עבריה אל הדגל! שירותן של נשות היישוב בכוחות הבריטיים במלחמת השנייה- היבטים לאומיים ומגדריים
- ד"ר מיכל דל, תנ"ך**
פרשנות אורתודוקסית לתורה בעידן של תמורות הפולמוס בפירושה של ר"צ מקלנבורג ומלבי"ם
- ד"ר פאני הירשנברג, ספרות עם ישראל**
בחינות ספרותיות בשירת הנשים בערבית-היהודית של יהודי מרוקו
- ד"ר אלישבע כהן, ספרות עם ישראל**
שירה עברית על אם הדרך - שירה עברית מסיציליה של המאה ה-19 שורשיה, נופה ופירותיה
- ד"ר יעקב זיסברג, תלמוד**
היחס למצוות ישיבת ארץ ישראל ולארץ ישראל בימי הביניים
- ד"ר מרים טל, ספרות עם ישראל**
ההתמודדות עם נושא זהות האישית והזהות הלאומית בסיפורת הישראלית בשנות התשעים
- ד"ר אילת יפת, לשון עברית ולשונות שמיות**
לשון וסגנון ביצירותיה של דתיה בן-דור
- ד"ר חפציבה ישי עמיחי, לשון עברית ולשונות שמיות**
פעולות דיבור ויחסי מגדר במחזות ישראלים מודרניים
- ד"ר אהוד לוי, לימודי המזרח התיכון**
גלובליזציה של רדיקלים אסלאמי ערב הסעודית, האחים המוסלמים והתפתחות רשת הטרור האסלאמי הסוני 1962-2001
- ד"ר תמר מאיר, ספרות עם ישראל**
סיפורים בהקשרם ברות רבה - פואטיקה של עריכה
- ד"ר אירית נחום, לשון עברית ולשונות שמיות**
לשוננו של לוי קיפניס ביצירותיו לילדים היבטים סגנוניים וטקסטואליים
- ד"ר יוסף סלוטניק, תלמוד**
פרשנות התלמוד של רבי ישעיה דירני הזקן לפי תוספותיו ופסקיו למסכת עבודה זרה ושאר כתביו ההלכתיים
- ד"ר יוסף עוזיאל, לימודי ארץ ישראל וארכיאולוגיה**
דרום מישור החוף בתקופת הברונזה התיכונה
- ד"ר עינת עמבר-ערמון, לימודי ארץ ישראל וארכיאולוגיה**
נרות השמן מהתקופה ההלניסטית בארץ ישראל לאור הממצא בחפירות מרשה: שמרנות ומסורת לצד יצירתיות וחדשנות
- ד"ר טל פבל, לימודי המזרח התיכון**
השינויים בהגבלות השלטוניות על השימוש באינטרנט בסוריה, במצרים, בערב הסעודית ובאיחוד האמירויות בין השנים 2002-2005
- ד"ר יעקב פוקס, תלמוד**
פירוש רש"י למסכת מועד קטן ביורדים באיהווי, בדרכי מסירתו ובעיצובו
- ד"ר עדי פורטוגו, תולדות ישראל**
משמאל סוציאליסטי לשמאל חדש? : זרמים בציבור ובפוליטיקה בישראל בין השנים 1967-1982
- ד"ר יהודה פרידלנדר, תולדות ישראל**
הגות ומעש ציוניים ומתנגדים לציוניים בקרב רבני הונגריה מהקונגרס הציוני הראשון (1897) עד שנות החמישים של המאה העשרים
- ד"ר יוסף פרוץ, תנ"ך**
התורה בכתבי יד, בתיקוני סופרים ובספרי תורה אשכנזיים בתקופת ימי הביניים: נוסח, פרשיות ותפוחות וסתמיות וצורות השירות
- ד"ר יוסף צ'רני, הסטוריה כללית**
השתלבותם של יהודים בתפקידים בכירים במינהל הבריטי בממשלת המנדט, 1920-1948
- ד"ר דוד קורן, אא, לימודי המזרח התיכון**
זהותו הדתית של אש"ף, 1964-1973
- ד"ר שלומית קינל, ספרות עם ישראל**
סיפורת נשים בספרות התחייה העברית: חוה שפירא, דבורה בארון ואלישבע ז'רקובה-ביחובסקי
- ד"ר קרן חוה קירשנבום, תלמוד**
ריהוט פנים-הבית במשנה
- ד"ר יהושע רייס, תנ"ך**
אמנות העריכה בספר יהושע- מבנה, אידיאולוגיה והיסטוריוגרפיה
- ד"ר אברהם שמלי, תולדות ישראל**
מוטיבים לאומיים ביצירה החזותית הישראלית
- ד"ר אמת שר-אבי, לימודי המזרח התיכון**
"ועמדו זרים ורעו צאנכם" שאלת הלגיטימיות של הסלטאנים הממלוכים (923-648 ה' / 1250-1517 לסה"נ)
- ד"ר עידית אברם, אנגלית**
התרומה האוטונומית של החתביר, הסמנטיקה והפרגמטיקה לרכישת מערכת הידוע בעברית והקשר לתאוריית המוח
- ד"ר אורית אמירם, אנגלית**
עיבוד רמאים לשוניים וחזותיים סותרים על ידי ילדים בעלי לקות שפה ספציפית (SLI)
- ד"ר אפרת בוקריס, מוסיקה**
הסיפור המקראי "בת יפתח" במוסיקה מערבית: אינטרפרטציות, קונטרפציות וסגנונות
- ד"ר זאנה בורשטיין-פלדמן, אנגלית**
שפה וזהות בהשתלבותם של מהגרים דוברי רוסית בישראל: מחקר בין-דורי
- ד"ר יפעת בילואוס, לימודי מידע**
לכלכלת המנתות של המידע ברשת האינטרנט: היבטים טכנולוגיים וחברתיים
- ד"ר פבל ברגינסקי, אנגלית**
הסמנטיקה של הקידומות זא- ברוסית
- ד"ר רות גולדברג, מוסיקה**
אפיונה של מוסיקת הכליזמרים בחתונה החסידית בישראל



ד"ר ציפי ריון, פסיכולוגיה
השפעתם הדיפרנציאלית של מאפייני המטלה על יכולת העברה ועל תהליך למידת מיומנות

ד"ר אירית שדה (יניב), חינוך
פיתוח מיומנויות חקר בסיסיות ודינאמיות וטיפוסי ידע בתהליך למידת חקר פתוח (Open Inquiry) לעומת למידת חקר מונחה (Guided Inquiry)

ד"ר אריה שטרן, כלכלה
איכות מוצרים בשוק עם מידע אסימטרי

ד"ר קרן שלו איילות, לפסיכולוגיה
נקודת מבט התקשורתית על הכרת תודה בזוגיות: הקשר שבין דפוסי התקשורת, הנטייה והחוויה של הכרת תודה ואיכות היחסים הזוגיים

ד"ר ליפא שמוע-ניר, פסיכולוגיה
התנהגות תוקפנית בנהיגה כפונקציה של תחושת לחץ, סגנון התמודדות עם לחץ וסגנון נהיגה

ד"ר אהרן אורונשטיין, משפטים
שומת נזקים לרכוש במשפט העברי

ד"ר אלקנה לייסט, משפטים
על הרלבנטיות של המניע במשפט הפלילי המהותי

ד"ר דב סולומון, משפטים
ההיבטים המשפטיים של הקצאת הסיכונים בשוק המשני למשכנתאות

ד"ר אילן סלע, משפטים
תשלומי הנזק של החובל בחברו במשפט העברי: בין דיני עונשין לדיני ממונות

ד"ר שוקי פרידמן, משפטים
המשפט הציבורי באסלאם בראי סיאסה-שרעיה

ד"ר בני קלדרון, משפטים
מיסוי מתנות וירושות שהורים מעניקים לילדיהם

ד"ר רחל קפלן, משפטים
אוטונומיה ויחסים בגישור: שניות רעיונית והבנתה לאור תיאורית היחס החוויית

ד"ר איתן אוקון, מדעי החיים
השפעות החומר האורגנטורי AS101 על פתולוגיות נוירודגנרטיביות

ד"ר יאיר אניקסטר, מדעי החיים
הבסיס המולקולארי של הפרעות מולדות בטרנספורטרים של מערכת העיכול ושל ליזוזומים

ד"ר עידו בנימין, מדעי החיים
ביטוי יתר של הגנים At1 או At2 ממלון רגיש לכשותית הדלועיים מקנה עמידות למחלה

ד"ר שרית ברט, מדעי החיים
Trypanosoma brucei - סטפילי-ה

ד"ר אפריים ברנר, מדעי החיים
מעורבות של PKC α - ו PKC δ במסלולי האותות המושרים על ידי אינסולין בעור

ד"ר נורית גרינברג-אטקוביץ, מדעי החיים
הביטוי והמייחוד של Porphobilinogen deaminase (PBGD) כמנגנון בקרה של ביוסינתזה פורפירינים

ד"ר מרינה גרצביין, מדעי החיים
אפיון תפקידו של STAT3 במסלולי העברת אותות המתווכים על ידי אינסולין בעור

ד"ר מוטי דרוז, מדעי החיים
אימונווגניות החלבון AP של החיידק אאירומונס סלמוניסידה בדגי זהב, הגנה מולדת ונרכשת נגד מחלת הכיבים; השפעת עקה (Stress) ופיתוח תרכיב לחיסון נגד המחלה

ד"ר ליאת המר, מדעי החיים
השפעת החסר של החלבון β -catenin על תהליכי חלוקה והתמיינות בחיה השלמה ובקרטינוציטים בתרבית

ד"ר אורה הס, מדעי החיים
חקר הבסיס המולקולרי של ציר הגדילה בילדים נמוכי קומה

ד"ר רן הרמן, מדעי החיים
עמידות למחלת הפורזיום מגזע 1.2 במלונים: הורשה, מיפיו ואפיון פיסילוגי

ד"ר יהודה זלצברג, מדעי החיים
חסר בגן Meig1 גורם לפגיעה קשה בייצור תאי זרע בעכבר

ד"ר אסתר יוסוב, מדעי החיים
אפיון תפקידו של PKC δ בתהליכי חלוקה והתמיינות של קרטינוציטים

ד"ר עדינה כהן, מדעי החיים
נגיף סרקומת קפושי: היבטים קליניים ומולקולריים

ד"ר גיתית לביא-שחק, מדעי החיים
דינאמיקת אוכלוסיות תאי B: התפתחות תאי B והתגובה החיסונית ההומורלית

ד"ר דפנה לוי-הירש, מדעי החיים
היבטים חדשים בתפקוד הגן Pim-2, באפופטוזיס ובמעגל חלוקת התא

ד"ר אהרון לוין, מדעי החיים
השפעת פונגצידים סיסטמיים ומשרני עמידות על רבייה מינית של Phythophthora infestans

ד"ר יניב לוסיטיג, מדעי החיים
מבנה ותפקוד של ה-SRP (Signal Recognition Particle), וחשיבותו למעבר החלבונים אל הרישתית האנדופלסמית בטריפנוזומיטיות

ד"ר אסתר לוקסיביץ' חגי, מדעי החיים
קינטיקה של HVC (Hepatitis C Virus) חזויו מוקדם של התגובה לטיפול בקרב חולי הפטיטיס C כרונית

ד"ר יעל למפרט, מדעי החיים
מבנה ותפקוד אוכלוסיות החיידקים הטבעיות בריד אלמוגי אבן במפרץ אילת

ד"ר משה נתן, מדעי החיים
קונפליקט בין-זוויגי ברביית התוכן האוסטרלי Melopsittacus undulatus

ד"ר חגית סאלם, מדעי החיים
תפקידו התאי וההתפתחותי של הקינאז Nek7

ד"ר יניב סאלם, מדעי החיים
מעורבות הטירוזין קינאז Fer בבקרת תהליכים סרטיניים

ד"ר סיגל פאר, מדעי החיים
מנגנון הקשר בין מבנה גרעין תא הזרע לפוריות הגבר

ד"ר אוראל פסדר, מדעי החיים
הבנת מנגנון מעורבותו של הטירוזין קינאז p94fer בבקרת חלוקת תאים ממאירים

ד"ר גבריאל פריי, מדעי החיים
ברור מנגנון הפעולה של תרכובות טלור על תאי T ממאירים in vivo - in vitro

ד"ר עפרה ריקובר, מדעי החיים
Nitric Oxide הגנה וניק בתרביות תאי לב

ד"ר קרן שטרנהל-רון, מדעי החיים
השראת שינוי התפתחותי של כבד לבלב אנדוקריני: אפיון תפקוד תאי β כבדיים תחת התקפה אוטואימונית במחלת הסכרת

ד"ר ריאם אבו-מוך, כימיה
פיתוח שיטות שונות להכנת דספרסיות יציבות של ברזל אוקסיד וחומרים מגנטיים אחרים

ד"ר אשי אופיה, כימיה
חקר התכונות האלקטרוניות של אלקטרודות ננופוריות מחלקיקי TiO $_2$, סינתזה, אפיון ויישומים לעבור תאים סולריים מרוגשי צבע

ד"ר יונית בוגוסלבסקי, כימיה
ננוספרות פונקציונליות המבוססות על תחמוצת ברזל מגנטית (maghemite) וסיליקה בעלות התפלגות גדלים צרה: הכנה, אפיון, מודיפיקציות פני שטח ושימושם

ד"ר מירי בן-ניסן (קופל), מדעי המחשב
שיטות לשיפור העיבוד של קבצים דחוסים

ד"ר מרים גרינשטיין-פינה, כימיה
חקר תהליכים פוטוסינקליים בתאי-שמש מרוגשי צבע

ד"ר אסף דויטש, פיסיקה
מחקר ופיתוח מולטידיסציפלינרי של מדדים ואמצעים פיסיקליים חדשים לחקירת תאים מקשריות לימפה

ד"ר איריס האס (עובדיה), כימיה
פיתוח חלקיקים ננו-מתכתיים בשיטה הסוואלקטרוכימית

ד"ר יובל וייס, פיסיקה
השפעת ספיין ואינטראקציות על נקודות קוונטיות וננו-חוטם

ד"ר חגי וילצ'יק, פיסיקה
תובלה במערכות מזוסקופיות מורכבות



ד"ר לירן דנסקי-ברנגה, פסיכולוגיה
מודל תהליכי להסבר תופעת התנגדות אמהות לחיסון תינוק

ד"ר אורית הוד-שמו, חינוך
מערכת היחסים בין ובתוך ממדי הדימוי היוזאלי: חיות, שליטה והעדפה

ד"ר עינת הולנדר, סוציולוגיה ואנתרופולוגיה
"הגבר הישראלי החדש"? שינויים בהבניות של גבריות בראייה בין-דורית

ד"ר שרית הופרט (סויד), חינוך
אותנטיות בגוויות כפן של מובחנות עצמית וכמנבאת הסתגלות לנישואין

ד"ר אודליה היזר (כהן), כלכלה
מדיניות הגירה והתנהגות מהגרים בשווי משקל

ד"ר מיכל ובר (ויט), כלכלה
על מדידת ניידות בהכנסות

ד"ר מיה וולף, פסיכולוגיה
היחסים בין נערות הסובלות מהפרעת אכילה לאבותיהן ותומתם לפרוגנוזה של הטיפול בהפרעה

ד"ר אפרת ויגנסקי, קרימינולוגיה
שיפוט מוסרי בקרב שופטים: פסיכודינאמיקה פונקציונלית של הקצאת ענישה בגין עבירות פליליות

ד"ר לאה וילינגר, גאוגרפיה וסביבה
גיאוגרפיה של הזיכרון ייצוגים תרבותיים בנוף העירוני מוזיאון יד ושם, המוזיאון היהודי בברלין ומוזיאון השואה בווישינגטון

ד"ר דיאנה וינברג, מינהל עסקים
מערכות יחסים בתאוריית היבוא: השלכות לגבי המחויבות לקשרי יבואן-סוכן

ד"ר חדווה וינסקי-פריץ, מדעי המדינה
תפקידים של קשרי עבודה באיכות גבוהה ותנאים פסיכולוגיים בהגברת המעורבות בהתנהגות חדשנית בארגון בקרב ארגונים במגזר הציבורי ובמגזר הפרטי

ד"ר הילה חבר, פסיכולוגיה
העברה בין דורית של טראומת השואה לנערות, בנות הדור השלישי לשואה: תרומת דפוסית התקשרות, ייצוגי אם פנימיים, בריאות נפשית ואמפתיה לדמויות האם והסבתא להתמודדות עם חוויות המסע לפולין

ד"ר ויטלי טבלב, קרימינולוגיה
הפרעת קשב וריכוז עם היפראקטיביות כפי שהיא נתפסת בעיני בני נוער הסובלים ממנה ומעורבים בפעילות אנטי-חברתית

ד"ר אפרת טילינגר, סוציולוגיה ואנתרופולוגיה
להתגבר ולהתגבר: גוף, זהות ורגש בסיפורי מחלה של מתבגרים באינטרנט

ד"ר אחינועם טל, פסיכולוגיה
העדפת בסיסי כוח וההיענות להם: שיקולים ומניעים של מנהלים ועובדים במצבי קונפליקט

ד"ר מירב יצחק הלוי, מינהל עסקים
השפעת שילוב ומורכבות התנהגותית של הנהלות בכירות על ביצועי יחידות עסקיות אסטרטגיות-התפקיד המתוחך של אמבידקסטרטי

ד"ר ענבר כהן, פסיכולוגיה
תרומת דפוסית ההתקשרות אצל אמהות החולות בסרטן השד ליכולת הנפרדות וגיבוש הזהות העצמית של בנותיהן המתבגרות

ד"ר נילי לביא, פסיכולוגיה
מאפיינים התנהגותיים של בני זוג התורמים להתפתחות בטחון בהתקשרות במערכת יחסים רומנטית

ד"ר איילין להט, פסיכולוגיה
הדינמיקה של הייצוג המנטלי של הדמות האימהית בגרות-השלכות הייצוג האימהי הפעיל על דפוסי הפעולה של מערכת ההתקשרות

ד"ר דורית לוי, עבודה סוציאלית
הסתגלות בקרב נשים יוצאות אתיופיה: תרומתם של משאבים אישיים וסביבתיים

ד"ר מיכל לוי, חינוך
בדיקת תקפותו של מודל למיון תופעות דיכאוניות

ד"ר עינת לוי-גיגי, פסיכולוגיה
גורמים המשפיעים על אפקט ההטעיה בעדות ראיה מתוך פרספקטיבה של קונטקסט

ד"ר בלה ליוש, חינוך
בין שמורת סף לסוכנת שינוי נשים חרדיות בתחומי השכלה, פרנסה ופנאי, באור התיאוריה המעוגנת בשדה

ד"ר אביטל ליטוין, פסיכולוגיה
ייצוג אם, ייצוג אב וייצוג עצמי הורי במעבר להורות אצל נשים וגברים בעלי סגנונות התקשרות שונים

ד"ר פרח ליכט, חינוך
השוואה בין שני מודלים נורמטיביים לקבלת החלטות

ד"ר ניסן לימור, מדעי המדינה
היבטים פוליטיים בהליכי חקיקת חוק העמותות

ד"ר ליטל מאור כהן-רוז, קרימינולוגיה
התקשרות לזולת, לילדים ולגוף כהסבר להבדלי מגדר בהצדקת התאבדות

ד"ר חנה מדלר-לירז, סוציולוגיה ואנתרופולוגיה
מנהיגות ורגשות: סגנון מנהיגות וכישורים רגשיים של מנהלים כמשפיעים על החוויה הרגשית של נציגי השירות והלקוח

ד"ר גילה מילר, עבודה סוציאלית
העברה בין-דורית והתפתחות של סגנונות נהיגה בקרב נהגים צעירים

ד"ר רוד נאמן-חביב, קרימינולוגיה
שיפוט מוסרי בקרב אסירים משוחררים: הקצאת עונש בגין עבירה פלילית על בסיס מידע בדבר נזק, כפרה וחרטה

ד"ר ג'ולי סגל-רוזנמן, פסיכולוגיה
עיבוד אוטומטי ומבוקר בזיכרון עקיף אצל צעירים ומבוגרים: אינטגרציה טרמינולוגיה

ד"ר מרב סולומון אבן-חן, עבודה סוציאלית
התנהגות אלימה בקרב בני נוער בישראל בצל הטרור ואיום הפינוי: תרומתם של משאבים אישיים וסביבתיים

ד"ר סוזן סופר-רוט, פסיכולוגיה
התקשרות בבגרות ותגובות רגשיות לשמחה של בן/בת הזוג - חקירת ויסות הרגשות החיוביים ביחסים קרובים

ד"ר מיכל סלצקי, מדעי המדינה
מרכיבי הצלחה של יח"צנות עסקית, ממלכתית ומלכ"רית: גורמים להצלחת הכנסת קומוניקטיבים בתחומי חדשות 'רכות' ו'כלליות' לעיתונות היומית המודפסת בישראל

ד"ר יעל סקה, קרימינולוגיה
בין קורבנות (Victimization) לצמיחה פוסט-טראומטית: הבניית הטראומה של הורים ששכלו את ילדם בפיגוע טרור

ד"ר שרי פישמן-פורמן, חינוך
הקשר בין ההקשר והמעורבות בספורט לבין ההכרה החברתית והשכילה המוסרית בקרב מתבגרים ספורטאים ולא-ספורטאים

ד"ר מיכל פלדמן, חינוך
שאלון חדש למדידת סגנונות הקיום וקשריו עם משתני אישיות וערכים

ד"ר רוני פרוז, פסיכולוגיה
הסלמת מחויבות (אסקלציה) בהחלטות על השקעת זמן

ד"ר רחל פרידמן-בלבן, פסיכולוגיה
היכולת הרפלקטיבית ואיכות היחסים הבין אישיים אצל הסובלות מאונורקסיה נרוזה מסוג הבולמוס וסילוקו

ד"ר אורית צייכנר (חור), חינוך
השפעתם של סוגי משוברים שונים (משוברים לתוכן, משוברים ליכולת ומשוב למאמץ) ושל גורמים אישיותיים על הישגים, שביעות רצון והתמדה של תלמידים בסביבת לימוד מרוחק

ד"ר שרה קליין, חינוך
אפיון התפיסה של הרעיון הביולוגי המרכזי "הומיאוסטזיס", הנלמד באופן מפורש באמצעות כלים ממוחשבים

ד"ר אהרון קמפינסקי, מדעי המדינה
דת, צבא וחברה בישראל: תמורות בעיצובה ובדרכה של הרבנות הצבאית

ד"ר צוריאל ראשי, מדעי המדינה
תקשורת ואתיקה עיתונאית ביהדות: חובת הציבור לדעת - הלכה ומעשה

ד"ר אודליה רוזין, כלכלה
השמנת יתר: היבטים של כלכלה התנהגותית ומדיניות ציבורית

ד"ר נפתלי רוזנפלד, חינוך
דימוי ויזואלי של ה"מופשט" כמסייע ללימוד פיזיקה

ד"ר אשר רוז, פסיכולוגיה
הממליץ ה"טוב" והממליץ ה"רע": גורמי ויסות לאפקט רכות במכתבי המלצה

גיליון 120 • אוגוסט 2008
כתב-עת למדע ולמחשבה

גליליאו



מו"ל: קבוצת כתובת: רח' שפע טל 6 תל-אביב, מיקוד: 67013, ת.ד. 57388, מיקוד: 61572, טל: 03-5652100

סמנכ"ל מערכת ופרויקטים: איילת מעברי

עורכת: שלומית עוזיאל'ר

מעצב גרפי ראשי: נדב אליהו

עורך מדעי: צבי עצמון

מעצבת ועורכת גרפית: דנה גוטליב

עיצוב תדמית SBC: אולה נסטרובה
 מנהלת קדם דפוס והפקות: אביגיל יעיש
 קדם דפוס: קובי סלמה, יעקב ראובן, מקסים רומשצ'נקו
 עיבוד תמונות וסריקות: יבגני צ'צ'יק
 מיחשוב ומאגרי מידע: בני כלילי
 מזכירות: יהודית שיינברגר
 אחראית הפצה: יעל טיירי
 הפצה שיווקית: משה פרידמן 050-6403007, דרור לוי 050-8993070
 דפוס: אחדות
 כריכה: שחף
 הפצה: חברת "בר פוינט אופ סיל", טל' 03-6070707

כתבי מדורים: יורם אורעד, ד"ר יוסי אלרן, מיכל אלרן, ישראל בנימיני, ד"ר דרור ברניר, ד"ר מרים דישון-ברקוביץ, דינה וולודרסקי, מריוס כהן, נעם לויתן, מיכל סחף, טל ענבר, עדן פייביש
יועצים מדעיים: פרופ' משה אבלס, פרופ' רון אהרוני, פרופ' יצחק דותן, פרופ' שלמה וינר
יועצי מערכת: ד"ר צפירי קולת, ישראל בנימיני, אריה מלמד-כץ, ד"ר יואב בן-דב

מחלקת שיווק מוסדי: נועם ברוך (שלוחה 1233), קולט גורי (שלוחה 1248), אליוס בן-ישראל (שלוחה 1432)
מנהלת שירות לקוחות: סטלה ורד
שירות מנויים: דינה ועקנין, סאלי ראובני, אורית קסטרו, מריה אדלס, פריץ רותם, שימריית חסון, נילי קדם, נורית אפלמן
אחראית מוקד הזמנות: תמר קרידי
מנהלת שימור לקוחות: עינת נגר (שלוחה 1157)
מנהלת מכירות מנויים: ריקי לנדסברג (שלוחה 1231) riki@sbc.co.il
מנהלת מכירות מחלקת שטח: מירב אברך
מנהל תחום אינטרנט: אורן שמאי
מעצבת ראשית אתר ifeel: יואלה ברמץ
מפיקת מגזינים דיגיטליים: קטיה גורחוב
מנהלת שיווק אתר ifeel: אור סקרין-ברק, or@sbc.co.il
מנהלת פיתוח עסקי: ירדן פריש, yarden@sbc.co.il
יעל גל זאדה, 050-8993070, yaelg@sbc.co.il
מנהלת מסחרית מגזיני לקוחות: אירית בנאי-נגרין, iritb@sbc.co.il
מנהלת כוח אדם: חגית מור (שלוחה 1168)

מחלקת כספים: אביבה דוד, שיר כהן, חלי סופר,
 ילנה צ'אק, סמדר כהן

משרד רו"ח: אבדין ושות' רואי חשבון

שירות לקוחות באינטרנט: www.sbc.co.il/sherut

מאמרי "מחקרי אוניברסיטת בר-אילן" נכתבים ונערכים בשיתוף עם צוות בר-אילן:
 עורך אחראי: ירח טל
יועצים מדעיים: פרופ' הארולד בוש, ד"ר אורן הרמן, פרופ' שלומית מיכאלי, פרופ' אורי ניר, ד"ר ינאי עופרן, פרופ' מירי פאוסט, פרופ' אריה צבן, ד"ר ירון שב-טל, פרופ' בנימין שרדני
עורך מדעי: ד"ר עמוס כרמל
מרכזת מערכת: שרית לוי
טלפון: 03-5318992 פקס: 03-7384067
מייל: yerach.tal@mail.biu.ac.il



תמונת שער: אילוסטרציה: דנה גוטליב תמונות: אימגיבנק / Gettyimages

רכזת פרסום: שירי אבקסיס shiria@sbc.co.il

מנהלת מכירות: נחמה שקדי

מנהלת מחלקת תיאום מודעות: דורית מימון

עיצוב מודעות: הדר שמואלוב

מנהלת יחסי ציבור: רוזית כהן

המו"ל אינו אחראי לפרסומים, תוכנם, סגנונם, עיצובם ו/או התמונות הכלולות בהם. כל המודעות מפורסמות באחריותו הבלעדית והמלאה של המפרסם, על פי הזמנתו ובהתאם לאישורו, כי הוא זכאי כדון לפרסם המודעה.

COSMOPOLITAN	Forbes	נישה	הספ	אחר	גליליאו	הורים	MOUNTAINBIKE	הספ	ישראל	גליליאו צעיר	רנב
דון האו	דון האונל	סטטוס הירחון לחשיבה ניהולית	משפחה טובה	DO	PG	ESTETICA	MAMA	להיות משפחה			

להזנות מנוי בין השעות 09:00-17:00 :155-505-1599
 ניתן להשאיר הודעות במענה הקולי 24 שעות ביממה.
 להחלקת שירות מנויים: 101-505-1599
 להזנות מנוי דיגיטלי: eMag.co.il

שיוני כתובת ניתן להעביר בפקס: 03-5626476,
 או במייל: sherut@sbc.co.il



ד"ר נעמה פריימן-בודנר, כימיה
הכנה ואפיון של ננו ומיקרו-חלקיקים המבוססים על טיטניה בעלי התפלגות גדלים צרה

ד"ר אורן קאפח, מדעי המחשב
טכניקות מניפולציה עבור בעיות בתיאום דגמים

ד"ר אלישבע קופליק, מומחית
על ערכים עצמיים של לפלאסיאנים קומבינטוריים

ד"ר אידית קטאש, כימיה
מודיפיקציה מבוקרת של שכבות חד-מולקולריות על ידי תגובות סולפונציה

ד"ר אנה רזגון, כימיה
שינויים מבוקרים של פני שטח של שכבות חד-מולקולריות באמצעות ריאנטים אורגניים ואורגנומתאליים

ד"ר ברכה ריבה שלום, מדעי המחשב
השוואת רצפים ביולוגיים

ד"ר מיטל שקל-פירן, כימיה
פונקציונאליזציה קוולנטית ולא קוולנטית של ננו-צינורות פחמניים

ד"ר שי תירוש, כימיה
ננו-חלקיקים בעלי תכונות פני שטח מבוקרות: סינתזה, אפיון ואפליקציות במערכות פוטואלקטרוכימיות

ד"ר ניסים אבישר, פרשנות ותרבות
פסיכולוגיה, אחריות חברתית ומעורבות פוליטית: האינתיפאדה הראשונה והפסיכולוגים בישראל

ד"ר יאיר אלדן, ניהול ויישוב סכסוכים
להשאיר את הדלת פתוחה! יסודות ההרחקה והמוות אצל הנידוי בספרות חז"ל עיון תיאורטי-ביקורתי

ד"ר בתיה אפלפלד, פרשנות ותרבות
הדיבוק הגלותי על האחרות שרודפת את הבמה הישראלית

ד"ר יוסי ארזואן, מדעי המוח
תהליכי עיבוד מוחיים של מטפורות חדשות: קורלטים אלקטרופיזיולוגיים

ד"ר טלי גולדשמיד, פרשנות ותרבות
מ"גאולה" ל"גולה": חורבן הציונות בדיסטופיה הישראלית

ד"ר עדי זרנקין, ניהול ויישוב סכסוכים
תפיסות ופרקטיקות של מגשרים בישראל

ד"ר רינת חלאבי, פרשנות ותרבות
ידע הרמנויטי של מורים: מבנה, מאפיינים והשלכות להוראת טקסטים

ד"ר רון כ"ץ, מדעי המוח
ניהול מו"מ אוטומטי המבוסס על מידול כללי ודמוגרפי של היריב האנושי

ד"ר מרב כץ-קמחי, מדע, טכנולוגיה וחברה
צמיחת האינטרנט בארצות-הברית: מיתוסים, מטאפורות ודיסקורסים 1990-2000

ד"ר יונה מילר, מיגדר
תפיסות ופרקטיקות אתיות של מנהלות ומנהלים: שיפוט מוסרי ומיגדר בהקשרים ארגוניים

ד"ר אתי פז, ניהול ויישוב סכסוכים
תפקיד הביטחון הפסיכולוגי ומקורותיו והשפעתם על הקונפליקטים והביצועים של צוותי עבודה

ד"ר דן פרי, מדע, טכנולוגיה וחברה
מינים זרים: הרקע הפילוסופי, ההיסטורי והחברתי לטיפול המודרני במיני בעלי חיים פולשניים זרים

ד"ר רענן רוז, מדעי המוח
תיסוף ע"י חומצות שומן חיוניות כטיפול בילדים בעלי הפרעת קשב וריכוז

ד"ר שירי שינבך מדינה, מדעי המוח
השפעת מידע רקע על איכות הביצוע במטלת קשב לעומת מטלת זיהוי וביטוייה בדפוס תנועות העיניים

ד"ר אורי תמיר, ניהול ויישוב סכסוכים
פוליטיקה קואליציונית בישראל-משא ומתן ועמימות במיקוח מרובה שחקנים (מפלגת העבודה 1949-1999)

ד"ר יאיר חורש, מדעי המחשב
שיטות חישוביות לניתוח קבוצות של מולקולות רנ"א לא מקודדות

ד"ר נטעלי חזנוב, כימיה
מנגנוני קטליזה ותהליכי עיכוב של אנזימים ממשפחות הסריין והציטאין פרוטאזות והשלכתם לתכנון תרופות-גישה חישובית ע"י מודלים מולקולריים

ד"ר יוסף טלויסוף, כימיה
חקר תכונות חומרים קתודיים חדשים ותוספים אורגניים בתמיסות אלקטרוליטיות לסוללות ליתיום יון נטענות

ד"ר ארתור יוסף, מתמטיקה
נושאים נבחרים על התנועה הבראנית מוצמדת קבוצות

ד"ר רבקה ניץ-פרנקל, מתמטיקה
אמידת התפלגות צריכת פריטי מזון על ידי שאלון תזכורת 24 שעות וסמן ביו-כימי

ד"ר דוד ש. יעקב, כימיה
חקר תגובות סונוכימיות, מיקרוגל ותגובות קונבנציונליות בנוזלים יוניים לסינתזות חומרים חדשים

ד"ר ליאור יצחקי, כימיה
התאמה של תכונות וחוקים מהנדסה מכנית למבנים מולקולריים

ד"ר אינסה לבוביץ, כימיה
קדם-תרופות של פורמאלדהיד וחומצה בוטירית כחומרים אנטי-סרטיניים חדשים וסלקטיביים: מנגנון פעילותם הביולוגי

ד"ר אביבית לוי, מדעי המחשב
תיאום דגמים עם שגיאות בכתובות

ד"ר רוז לין, מדעי המחשב
שיתוף פעולה בסביבות מרובות סוכנים

ד"ר פולינה לפידו, כימיה
קישור הפיך של ננוחלקיקים מגנטיים פונקציונליים לפני השטח של מיקרוספרות מפוליסטירן: הכנה, אפיון ושימוש לסינתזה של ביופולימרים

ד"ר ילנה לרמן, כימיה
נגזרות של אמינואינדאנים ואינדולים כחומרים המגינים על מערכת העצבים המרכזית פיתוח מעכבי אנזים Reverse Transcriptase של וירוס ה-HIV לטיפול במחלת ה-AIDS

ד"ר חביבה (חבי) מורד, מתמטיקה
ניתוח של מודל רגרסיה ליניארית מרובה עם אפקט אינטראקציה, כאשר המשתנים המסבירים נמדדים עם שגיאה

ד"ר אריאל מיטלמן, כימיה
מחקר ופיתוח של חומרים קתודיים חדשים עבור סוללות נטענות

ד"ר רפאל מינס, פיסיקה
השפעת הטמפרטורה, הרכב הממברנה והפולריות של נגזרות פורפיריניות על מידת קישורן לממברנות ופעילותן הפוטודינמית

ד"ר אבי מינץ, מתמטיקה
אגודות הנוצרות ע"י גרפים

ד"ר אלי סלוצקין, פיסיקה
סדר מושרה פנים בנוזלי ון-דר-ולס וקולון

ד"ר אמיר סנדץ, מתמטיקה
רווח סמן לציון סיכון

ד"ר אלעד פולק, כימיה
האלקטרוכימיה של אלקטרודות פחמן ואלקטרודות סיליקון אמורפי

ד"ר ערן פרטוש, כימיה
פונקציונליזציה של מיקרו-ננו-חלקיקים מפוליסטירן ונגזרותיו בעלי התפלגות גדלים צרה באמצעות קשירה קוולנטית של איניציאטור לפני השטח: הכנה, אפיון ושימושים

ד"ר שירלי פרטוש, כימיה
תכנון ופיתוח טכנולוגיה משולבת לסינתזה וסריקה ביולוגית רחבת ממדים לגילוי תרופות



84



54

מדורים

בראש ובראשונה

010

דפוסים חדשים

012

מכתבים למערכת • יצחק וינטראוב

012

חדשות • יורם אורעד, דרור בר-ניר, דינה וולדרסקי, נפתלי ישראל, נעם ליתן, מיכל סחף, טל ענבר, עידן פייביש, רועי צזנה

014

גשושית של נאס"א תחקור מקרוב את השמש • דודות פוריות – הסבר אפשרי להומוסקסואליות בגברים • נאס"א: ייתכן שהפניקס איתרה קרח על פני מאדים • תצפיות ראשונות ברגעים הראשונים של סופרנובה • תמר מימי מצדה גדל ומשגשג • קליטת גנים ממינים זרים – סיבה אפשרית ליציבות רביית הבתולין ברוטיפרים • חומרים מרדימים גורמים לתחושת כאב במערכת העצבים ההיקפית • ניסוי בקנה מידה מלא בכריות האוויר של החללית אוריון • תצלומים נדירים של ביוץ באדם • מתקנים כדוריים יסייעו בחקר פני מאדים • נגיפי ענק התגלו כבעלי מבנה מורכב בהרבה מקבוצות נגיפים אחרות • הקשר בין כושר אומדן להעדפת סיכון באדם ובדבורים

סקירת תערוכה • אמיר בן-שלום

074

"מדע – זה כל הסיפור", מוזיאון המדע על שם בלומפילד, ירושלים: מדוע השתקף פלוטו בבדיקה?

סקירת ספר • רון אהרוני

078

"השערת פואנקרה": לא רק רכילות מתמטית

החיים בקטן • דרור בר-ניר

080

ניסוי ארוך-טווח מספק תובנות חדשות על מהלך האבולוציה

זמן חלל • טל ענבר

084

הרוח הנושבת מן השמש

בינה מלאכותית • ישראל בנימיני

088

צעד בדרך אל המוח האלקטרוני

נפש • מרים דיסון-ברקוביץ

092

במשא ומתן, הבנת הזולת עדיפה על אמפתיה

קפיצת ראש • יוסי ומיכל אלרן

096

שעשועי מתמטיקה ומדע: מספרי פיבונצ'י



מאמרים

הניחוש הנכון בהגרלת הלוטו • דני הלמן
מומחים גורסים כי לוטו הוא משחק מזל טהור. לאו דווקא

030

ממדים נוספים - חלום או מציאות? • יבגני יורקובסקי ונועם הוד
ממש בימים אלה תתחיל הפעלת המאיץ LHC, שיסייע בחיפוש אחר הממדים הגבוהים - מעבר לשלושת ממדי המרחב המוכרים לנו

042

ממחקרי אוניברסיטת בר-אילן

המקום הקר ביותר ביקום • נועם גרוס ולב חייקוביץ
טמפרטורה נמוכה פי 10 מיליון מטמפרטורת החלל החיצון: החיפוש אחר הגביע הקדוש של הפיזיקה המודרנית

054

מבחנות ומבחנים • נורית קירש
מסלול המכשולים של חלוצות האקדמיה העברית

068



כדי לגלות את האמת, חייבים להאמין



גולן

תיקים באפלה

רוצים להאמין

THE X FILES - I WANT TO BELIEVE

TWENTIETH CENTURY FOX PRESENTS A TEN THIRTEEN PRODUCTION

DAVID DUCHOVNY GILLIAN ANDERSON "THE X-FILES: I WANT TO BELIEVE" AMANDA PEET BILLY CONNOLLY ALVIN "XZIBIT" JOINER MUSIC BY MARK SNOW
FILM EDITOR RICHARD HARRIS PRODUCTION DESIGNER MARK FREEBORN DIRECTOR OF PHOTOGRAPHY BILL ROE, ASC EXECUTIVE PRODUCER BRENT O'CONNOR WRITTEN AND PRODUCED BY FRANK SPOTNITZ & CHRIS CARTER COMPOSED BY MARK SNOW
DIRECTED BY CHRIS CARTER

WWW.XFILES.COM



PROPERTY OF FOX. PHOTOGRAPHS ARE ONE-DAY. REPRODUCTION OR OTHER USES WITHOUT THE WRITER'S PERMISSION.



נרשמים למועדון הלקוחות www.matalon.co.il ורואים את הסרטים לפני כולם

עכשיו בקולנוע



בראש ובראשונה

תיאוריית האבולוציה היא אחת המרתקות ורבות-ההשפעה בתולדות המדע. תיאוריית האבולוציה בדרך של ברירה טבעית, פרי רוחו של צ'רלס דארווין, לא זו בלבד שחוללה מהפכה במדעי החיים, אלא אף שימשה השראה ומודל להבנת תהליכים ויישומים בתחומי דעת רבים אחרים.

תהליכים אבולוציוניים פשוטים, כגון הופעת עמידות לאנטיביוטיקה באוכלוסיות חיידקים במעבדה, הודגמו זה כבר, והניסוי המראה כי עמידות כזו נובעת ממוטציה שהיתה קיימת בטרם חשיפת החיידקים לאנטיביוטיקה הוא אחד הניסויים הקלאסיים. לעומת זאת, בשל הקצב האיטי יחסית שבו מתחוללים שינויים אבולוציוניים מורכבים יותר, כמו התפתחות אברון-תא או איבר חדש, יש קושי להדגים ניסויית כיצד הם מתרחשים.

ד"ר דרווין, במדורו "החיים בקטן" בגיליון זה, מתאר ניסוי מרשים שנועד להדגים תהליך של אבולוציה מורכבת, ואשר ממצאיו ראו אור לאחרונה. המחקר, שנערך במעבדתו של ריצ'רד לנסקי (Lenski) באוניברסיטת מישיגן בארצות-הברית, החל בשנת 1988, ובמהלכו עקבו החוקרים אחר תרביות של חיידקי *E. coli* במשך למעלה מ-33,000 דורות. החוקרים המתיני לראות, אם במהלך הניסוי ארוך-הטווח יופיעו בתרבית חיידקים מוטנטיים המסוגלים לקלוט חומצת לימון ממצע הגידול ולנצלה כמקור פחמן. שינוי זה אינו דבר של מה-בכך, כיוון שהוא דורש הופעת נשא חלבוני המסוגל לקשור ולהכניס חומר זה לתאי החיידקים. שינוי כה ניכר כרוך בהתרחשות של יותר ממוטציה אחת, ושלבי הביניים – בניגוד לתוצאה הסופית – אינם מקנים בהכרח יתרון לפרטים שבהם התרחשו.

לאחר כשני עשורים של המתנה סבלנית, אכן נמצאו המוטנטיים המיוחלים. החוקרים בדקו ומצאו, שבמוטנטיים אלה התרחשו לפחות שתי מוטציות שונות, האחראיות ליכולתם לקלוט חומצת לימון ממצע המזון. מהן מוטציות אלו? האם התדירות הנמוכה שבה התרחשו מעידה כי הופעתן היתה תלויה בהתרחשות מוטציה אחרת, שקדמה להן ואשר טרם אותרה? הניסוי גם מעיד על חשיבות הסדר שבו מתחוללות המוטציות האקראיות, שהצטרפותן זו לזו עומדת בבסיס הופעתה של תכונה מהותית חדשה. בעולם המדע המודרני, שבו קצב המחקר (ולא פחות חשוב, הפרסום) מהיר ביותר, ניסוי הנערך במשך שנים כה רבות בטרם יניב תוצאות הוא מחזה מרשים ומאלף. בדרך מקרה, הדיווח עליו ב"גליליאו" מצטרף לדיווח, שהופיע לאחרונה גם בכתב-העת המדעי *Science*, על הצלחתו של צוות חוקרים ישראלי-שווייצרי להנביט ולגדל תמר צעיר מזרע כבן 1930 שנה, שנמצא בחפירות מצדה. באופן סמלי, שני מחקרים אלה מופיעים בגיליון "גליליאו" שמספרו 120 – הזדמנות טובה להרהר בערכם של החשיבה והתכנון לטווח ארוך ולמרחקים ארוכים.

עוד בגיליון: מאמרם של יבגני יורקובסקי ונועם הוד על החיפוש אחר ממדי מרחב נוספים, מעבר למוכרים לנו; קבוצת המחקר שאליה שייכים יורקובסקי והוד באוניברסיטת תל-אביב משתתפת בבנייה ובהפעלה של הגלאי אטלס במאיץ החלקיקים LHC, הנבנה בז'נבה, שווייץ, ושכילולו מתוכנן להתחיל בקיץ זה. הניסויים שיערכו במאיץ יסייעו לחוקרים לבדוק, אם אמנם אנו חיים במרחב-זמן מרובה-ממדים. בגיליון גם מאמרו של דני הלמן, המראה כי, בניגוד לתפישה רווחת גם בקרב מומחים, הלוחט איננו משחק מזל טהור – לפחות כשמדובר בגובה הזכייה; מאמרם של נועם גרוס וד"ר לב חייקוביץ על שימוש בלייזר לקירור אטומים כמעט עד האפס המוחלט, ועל תכונותיהם הייחודיות של אטומים בטמפרטורות נמוכות אלו; ומאמרה של ד"ר נורית קירש על דרכן הייחודית של החוקרות-הנשים הראשונות באוניברסיטה העברית. מאמר זה מופיע במסגרת שנת השישים למדינת ישראל ב"גליליאו", שאותה אנו מציינים במאמרים על תולדות המדע, הטכנולוגיה והאקדמיה בארץ ישראל.

יבגני יורקובסקי ונועם הוד, מחברי המאמר על חיפוש אחר הממדים הגבוהים, יתארחו בפורום "גליליאו", www.ifeel.co.il/galileo, ביום רביעי ה-27.8.08, בשעות 19:00-22:00, ויענו על שאלות הקוראים והגולשים. אנו מקווים לדיון מרתק.

קריאה נעימה!

שלומית עוזיאל רז



עורכת "גליליאו"

shlomit@sbco.il


אתרנו החדש באינטרנט **ifeel**.co.il

www.ifeel.co.il/galileo



סרבו

העתיקה, מורה על תיאור פשוט, נטול שיפוט של מראם של בעלי עור כהה. ה"אתיופים" ההומריים אף מתוארים כעם צדיק, צנוע, שלו ותמים. ואולם, במקורות מאוחרים יותר אנו מוצאים התייחסויות לא-אוהדות למאפיינים גופניים הנבדלים מאלה של היוונים, ובכלל זה עור חיוור במיוחד (בעמים הצפוניים) או כהה במיוחד.

היוונים והרומאים התייחסו לעור כהה במונחים אסתטיים וסמליים, שכן הצבע השחור (ולא רק ביחס לעור) נקשר בזוהמה ובכוחות אפלים. הסברים "מדעיים" לצבע העור הכהה נקשרו לגורמי אקלים, כגון צריבת השמש החמה במיוחד בדרום, או לטענה שאשה שראתה אדם כהה-עור במהלך הריונה תלד ולד כהה עור. כאשר הופיעו תיאוריות שקישרו בין סביבה לבין צבע עור ואופי, נולדו גם סטריאוטיפים בדבר אופיים של עמים שונים. 

לקריאה מורחבת:

F. Snowden, *Before Color Prejudice: The Ancient View of Blacks*, Cambridge, 1983.

L. Thompson, *Romans and Blacks*, London, 1989.

האם חקלאי העתיד יתנתקו מסביבתם?

במאמרה של ד"ר דניאלה דוויק "תיאוריית אזורי האקלים בעת העתיקה ומשמעותה האנתרופולוגית" ("גלילאו" 118), מביא המלומד סטרבו מדבריו של פוסידוניוס איש אפמיאה, שבאזורי אקלים חמים, לרוב היונקים שיער מקורזל, שפתיים בולטות ואפים שטוחים, הנגרמים בגלל החום.

שאלתי, האם היתה גם התייחסות של מלומדים קדמונים לצבע העור של בני-האדם?

בטורו של טל ענבר "חקלאות מדויקת – מהחלל", באותו גיליון, קוממה אותי הפתיחה: "דמיינו לעצמכם חקלאי: קם השכם בבוקר... שעות על גבי שעות במשך השנה כולה." ואילו במאה ה-21 החקלאי קם בשעה מאוחרת, קורא עיתון, שותה קפה ומציץ בצג המחשב שלו...

האם חקלאי העתיד אינם חייבים להתאמץ בעבודות השדה, לקום השכם בבוקר ולהיות במגע בלתי אמצעי עם האדמה והגידולים שהם מגדלים? הקדמה, כידוע, לא היטיבה עם החקלאות לטווח הארוך. תוצאותיה הן זיהום הקרקע והמים, וככלל, הסביבה שבה אנו חיים. הטור מתאר ניתוק של החקלאי מן הסביבה שבה הוא מגדל את גידוליו, והמצב עשוי להחמיר אם יאמצו החקלאים במלואם את הדברים המופיעים בפתיח המאמר (קרי, יתבטלו בבית).

חקלאי טוב ימשיך בעבודתו המסורתית וייעזר בכל השכלולים המודרניים, כי שילוב כזה הוא הדבר הטוב ביותר. גם לחקלאי הזכות להשתלב בקדמה ולא להישאר מאחור, אך הזנחת העבודה המסורתית, כפי שמשמע מהמאמר, תהיה צעד שגוי.

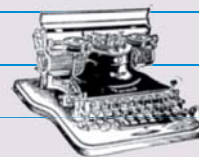
לעורר אשליות שהקדמה היא דבר שבלעדיו לא יהיה עתיד היא גישה לא-בריאה. איני קורא לזנוח את הקדמה, אך חשוב להיעזר בה בצורה נכונה, למען בריאות הסביבה ובריאות בני-האדם.

וינטראוב יצחק

טירת-הכרמל

◀ תגובת ד"ר דניאלה דוויק:

מובנה של המילה "אתיופי" ביוונית (Aithiops) הוא "צורב-פנים", והיא מופיעה כבר באפוסים ההומריים המתוארכים למאה ה-8 לפנה"ס. עצם המינוח, שהפך אחר-כך לכינויים של היושבים באזורים הדרומיים למצרים, ולמעשה בכל החלק הדרומי-יותר של אפריקה הידועה בעת



קלאודיוס פטולמאיוס, מחבר "גאוגרפיה", שנכתב במאה השנייה לספירה



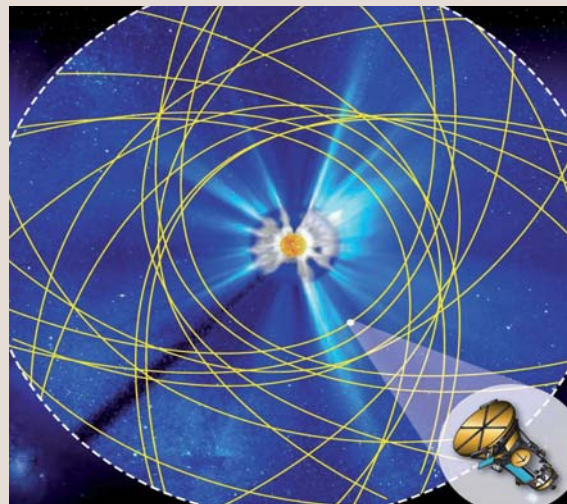
אילת שביט, אחד בשביל כולם? עובדות וערכים בוויכוח על האבולוציה של אלטרואיזם

הוותיקות והשנויות במחלוקת בתחום חקר האבולוציה, ולא פחות מכך – בשיח העוסק בבסיס הביולוגי של המוסר. שביט, בספרה, מציגה את ההסברים המוצעים לאבולוציה של האלטרואיזם, ודנה, בכלים מתחום הסוציולוגיה של המדע, בקשיים ובכשלים המאפיינים את המחקר בסוגיה זו. ד"ר אילת שביט היא מרצה במכללת תל-חי ועמיתת מחקר במחלקה לפילוסופיה ובמרכז לביולוגיה של אוכלוסיות באוניברסיטת דיוויס, קליפורניה. הוצאת מאגנס, 159 עמודים, מחיר מומלץ: 79 שקלים.

קרנית X ומפליטת חלקיקים מסיבית מעטרת השמש – אלה עלולים לפגוע ישירות בציד הנמצא מעבר לשכבת המגן. בנוגע לתובנות החדשות שעשויות להתחורר במהלך המשימה, אמר הופמן: "התובנות העיקריות יהיו בנוגע לזרימת האנרגיה לעטרה. נוסף על כך, חקר הרכב האבק הקוסמי המצוי סביבה, אפשר שישפוך אור על מערכת השמש משחר היוצרותה".



בעין האמן: משימת Solar probe plus העתידית. באדיבות נאס"א



מעבריה הקרובים המתוכננים של הגשושית בסמוך לשמש. מסלולה המתוכנן של הגשושית אליפטי, ומרחק הנקודה הקרובה ביותר אל פני השמש במסלולה הוא כעשרה רדיוסי שמש. הקו המקווקו מצוין מרחק מהשמש השווה ל-30 פעמים הרדיוס שלה. רדיוס השמש הוא 695 אלף ק"מ. באדיבות נאס"א



עטרת השמש, שאליה תישלח הגשושית במשימתה, ניתנת לצפייה גם מכדור-הארץ בלא מכשור אופטי, בעת ליקוי חמה מלא. תמונה זו צולמה בזמן ליקוי חמה המלא שנצפה בשלהי מרץ 2006 בטורקיה. שימו לב לאי-הסימטריה המאפיינת את העטרה. תצלום: עידן פייביש

לקריאה נוספת:

משימת Solar Probe Plus במרכז גודארד לטיסות

חלל, נאס"א:

<http://solarprobe.gsfc.nasa.gov>

המצפה השמשי וההליוספרי של נאס"א (SOHO):

<http://sohowww.nascom.nasa.gov>

יורם אורעד ועידן פייביש

המשך בעמוד הבא ←





לעולם בעקבות השמש

לשמש עצמה. בין השמש לבין האזור שבו מובחן שטף החלקיקים המרכיב את רוח השמש קיים כנראה גורם מתווך כלשהו הגורם להאצת החלקיקים, אך עד כה הוא טרם התגלה. כאמור, הגשושית שמשית פלוס תנסה להתחקות אחר גורם זה.

חוקרים חושדים שרבים מהחלקיקים המסוכנים הנוצרים במהלך סערות שמש מקבלים את האנרגיה שלהם בעטרה. הגשושית תנסה לצפות בתהליך מסירת האנרגיה בפועל, וכך לאפשר לחוקרים לחזות אירועים שבהם ייפלטו חלקיקים המסכנים את בריאותם ואת בטיחותם של אסטרונאוטים.

במקום הימצאותה של החללית בשיא קרבתה אל השמש, תגיע הטמפרטורה שלה לערך גבוה מאוד, של 1,400 מעלות צלזיוס. כדי להגן עליה, היא תצויד במגן חום מיוחד. המגן יהיה חייב גם לעמוד בפני התפרצויות קרינה חזקות ביותר, ששום רכב חלל לא היה צריך לעמוד בהן עד כה.

מקור האנרגיה של החללית יהיה, איך לא, השמש בכבודה ובעצמה. החללית תצויד בתאי שמש מקוררים בנוזל, שיספקו לה את האנרגיה החשמלית שלה תזדקק להפעלת מכשירה.

בצלילותיה אל עבר השמש, תסתייע הגשושית שמשית פלוס בכוכב-הלכת נוגה. לאחר כל צלילה, היא תחזור אל קרבת נוגה ואז תשוב ותחזור על עקבותיה אל עבר השמש. באופן כזה יושג רווח נוסף – התקרבות אל נוגה שתאפשר תצפית גם עליה.

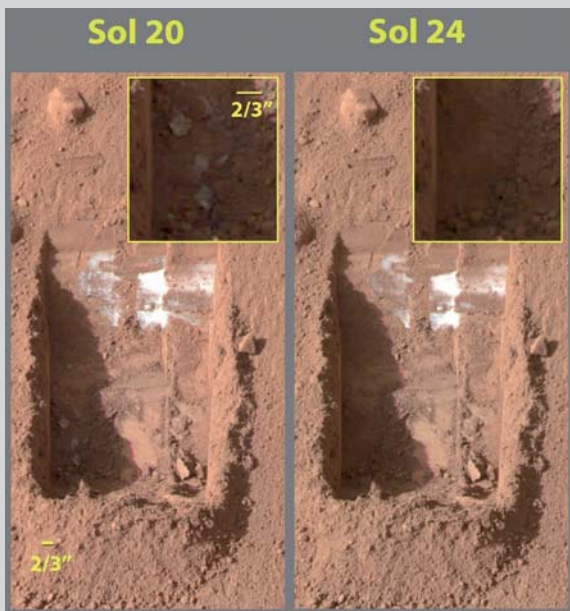
בריאיון עם כתב מערכת "גליליאו" עידן פייביש אמר פרופ' לאון הופמן (Ofman) מהאוניברסיטה הקתולית של אמריקה ומרכז גודארד (Goddard) לטיסות חלל של נאס"א במרילנד: "במהלך משימתה של הגשושית ינוטר האבק הקוסמי המצוי בקרבת השמש, שחלקו כנראה מורכב מאותם חומרים שמהם נוצרה מערכת השמש". כשנשאל על הסכנות הצפויות לגשושית במהלך משימתה, השיב: "קיימת סכנה מאבוקות שמש (Sun Flares) רבות-עוצמה בתחום של

זה למעלה מ-400 שנה נחקר הכוכב הקרוב ביותר אלינו ממרחק רב מדי, למגנת לבם של המדענים. והנה, לראשונה מתכננת נאס"א לשלוח גשושית שתבחן את השמש ופרמטרים שונים הקשורים בה ממרחק קטן הרבה יותר. במהלך משימתה תבצע הגשושית סדרה של התקרבויות, שבהן תצלול פעם אחר פעם אל עבר השמש ותשוב ותתרחק ממנה. בשיא קרבתה, תגיע החללית למרחק של 7 מיליון קילומטרים מפני השמש. מרחק זה שווה לכעשרה רדיוסי שמש בלבד (רדיוסה הממוצע של השמש הוא כ-700 אלף קילומטרים). במרחק כזה, גודלה הזוויתי של השמש יהיה גדול פי 23 ובהירותה גבוהה פי 500 בהשוואה לדמותה הנצפית מכדור-הארץ. מה שיראו משם, מסתבר, אין רואים היום מכאן.

המשימה, הקרויה גשושית שמשית פלוס (Solar Probe Plus), נמצאת לפי שעה בחיתוליה, ומתוכננת לצאת לדרך בשנת 2015 ולהסתיים לאחר כשבע שנות פעילות. החללית תנסה לפענח שתי תופעות מסתוריות, שעד כה לא נמצא להן הסבר. האחת היא תופעת הטמפרטורה הגבוהה מאוד של העטרה (Corona), השכבה העליונה של אטמוספירת השמש. הטמפרטורה של הפוטוספירה, שהיא שכבת פני השטח של השמש, היא כ-6,000 מעלות צלזיוס. ההיגיון הפשוט אומר שכל שנתרחק משכבה זו כלפי חוץ, תרד הטמפרטורה. למרבה הפליאה, ההפך הוא שקורה, והטמפרטורה דווקא הולכת ועולה עד שבעטרה היא מגיעה ליותר ממיליון מעלות צלזיוס. אף שחלפו כבר יותר משישים שנה מאז הבחינו חוקרים לראשונה בתופעה זו, עדיין לא נמצא לה הסבר מלא.

התופעה המסתורית השנייה שתנסה החללית להסביר היא ההאצה הבלתי מוסברת של חלקיקי רוח השמש. רוח השמש היא שטף של חלקיקים טעונים הנפלטים מן השמש. מהירות החלקיקים מגיעה ליותר מ-400 ק"מ לשנייה. למרבה ההפתעה, אין כל זכר לקיומה של רוח שמש סמוך

האם הפניקס איתרה קרח מים על פני מאדים?



נחתת המאדים פניקס (וראו: טל ענבר, "עוף החול על אדמת מאדים", מדור החדשות, "גלילאו" 119) חפרה באמצעות הזרוע המכנית שלה באדמת מאדים, והצליחה להכניס את דגימות הקרקע אל התנור המיוחד שנועד לחמם את הדגימות ולאפשר למערך הגלאים לזהות את מרכיבי הקרקע. תקלות מכניות שונות עיכבו קודם לכן את הכנסת הדגימות לתנור. מדעני נאס"א משוכנעים – לאחר השוואת תצלומים מהמקומות שבהם חפרה פניקס – כי התגלה קרח מים על מאדים! מדעני המשימה להוטים להכניס אל תוך החללית דגימת קרח, אולם עד כה לא הסתייע הדבר.

| טל ענבר

< צמד תצלומים מחפירה של פניקס. התמונה שממין צולמה יממות < אחדות לאחר התמונה שמשמאל ("סול" הוא הכינוי ליממה על מאדים). בתמונות הקטנות שבמסגרת קל להבחין, כי הקרח בכמה מהנקודות באזור המצולם נעלם בפרק הזמן שבין התצלומים. באדיבות נאס"א

המשך בעמוד הבא ←



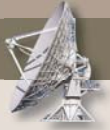
אוהבים את המגזין? רוצים לחלוק את החוויה הזו עם אחרים?

למחלקת מנויים דרושים אנשי מכירות טלפוניים
שעות עבודה נוחות • שכר גבוה!

ניתן לשלב עבודת שטח באירועים ובכנסים

לכרטיס: חגית, טל': 03-5652100 | שלוחה 273 | פקס: 03-6247404

SBC
ערוץ המגזינים



גאוה משפחתית

שאינן קרובות משפחה של הומוסקסואלים. מרבית המודלים שהציעו החוקרים לא ענו על כל הדרישות – במקצת המודלים הגן או הגנים המשפיעים על הומוסקסואליות התפשטו באוכלוסייה או נעלמו כליל, ובמודלים אחרים ריבוי ההומוסקסואלים בצד האם של המשפחה לא בא לידי ביטוי. המודל שתאם את הדרישות בצורה הטובה ביותר כלל שני גנים, שלפחות אחד מהם נמצא בכרומוזום X, כרומוזום שבגבר יש רק עותק אחד ממנו ומקורו באמו בלבד. גנים אלה, על פי המודל, הגבירו את פוריות הנשים, אך הקטינו את פוריות הגברים הנושאים אותם. תופעה זו, שבה תכונה מגבירה את ההצלחה הרבייתית של זוויג אחד על חשבון הזוויג האחר, קרויה *sexually antagonistic selection*, והיא ידועה זה כבר בחרקים, בעופות וביונקים.

קאמפריו צ'אני ועמיתיו טוענים כי על פי תוצאות מחקרם, סביר כי הגנים המשוערים מגבירים את המשיכה לגברים הן של נשים והן של גברים הנושאים אותם. תכונה זו מקטינה את סיכוייהם של הגברים להעמיד צאצאים ולהעביר את הגנים שלהם לדור הבא. לעומת זאת, בנשים הסיכוי לכך גדל, ומאפשר לגנים כאלו לשרוד באוכלוסייה בשיעור נמוך אך יציב.

מחקרם של קאמפריו צ'אני ועמיתיו מצביע על גורמים גנטיים המגדילים את הסיכוי של גבר הנושא אותם להיות הומוסקסואל, מבלי להתייחס להשפעה נוספת, הסביבתית, על הנטייה המינית – למשל, לסיכוי המוגבר של גבר להיות הומוסקסואל ככל שיש לו יותר אחים גדולים, שנולדו לפניו. עם זאת, המודל שנמצא במחקר מציג פתרון פשוט לשאלה כיצד קיימות הומוסקסואליות, וכן הסבר לכך שהתכונה נפוצה יותר בשושלת האמהית של הגבר ההומוסקסואל. על פי המודל, הגנים להומוסקסואליות שרדו מאחר שהם מקנים יתרון לנשים הנושאות גנים אלה, ואחוז הגברים ההומוסקסואלים באוכלוסייה עשוי לשקף את אחוז הנשים הפוריות-יותר באוכלוסייה.

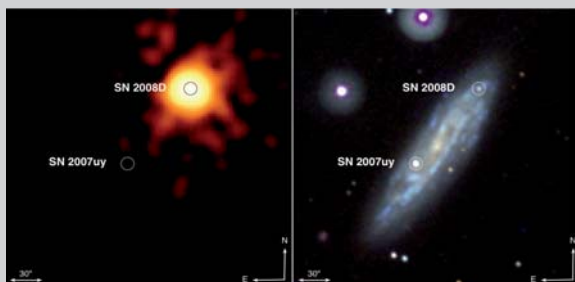
יש לזכור כי מחקר זה מציג מודל אפשרי לתופעה קיימת, אך אין הוא מוכיח שהומוסקסואליות היא גנטית. כדי לבחון את המודל יש לבדוד ולזהות את הגנים המדוברים.

נעם לויטן ודינה וולדרסקי

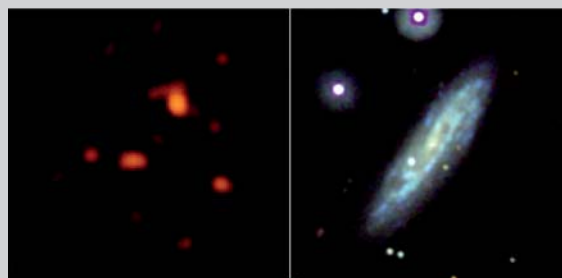
על פי תיאוריית האבולוציה, פרט המתאים לסביבתו שורד ומעמיד צאצאים, וכך מעביר את הגנים שלו הלאה. לאור זאת, דומה שקשה להסביר תכונה כגון הומוסקסואליות, המוכרת בקרב בעלי-חיים רבים – תמנונים, אווזים, איילים ועוד. כיצד ייתכן כי הומוסקסואלים – שסביר כי יביאו לעולם פחות צאצאים, אם בכלל, ממקביליהם הטרוסקסואלים – קיימים? הרי צפוי כי תכונה המונעת העמדת צאצאים תיעלם מהאוכלוסייה במהלך הברירה הטבעית. במחקר שפורסם בכתב-העת המקוון *PLoS ONE*, הציעו אנדראה קאמפריו צ'אני (Camperio Ciani) ועמיתיו מאוניברסיטת פדובה שבאיטליה מודל שנועד לענות על שאלה זו.

אף שעדיין לא זוהו גנים הקשורים ישירות להומוסקסואליות בגברים, ממחקרים שונים עולה כי קיימים גורמים גנטיים המשפיעים על תכונה זו. ממחקרים בתאומים, למשל, התברר כי לתאומים זהים יש סיכוי גדול יותר להיות בעלי נטייה מינית זהה מאשר לתאומים לא-זהים, ממצא המצביע על השפעה גנטית על הנטייה המינית. מאחר שקיימות כאמור עדויות כי הגנטיקה משחקת תפקיד בקביעת הנטייה המינית, פיתחו קאמפריו צ'אני ועמיתיו מודלים אחדים שנועדו לאפיין את הגורמים הגנטיים – הגן או הגנים – המשפיעים על הומוסקסואליות בגברים, תוך התייחסות לתכונות נוספות של הומוסקסואליות גברית.

החוקרים החלו בפיתוח המודלים תוך התייחסות לכך שבגברים הומוסקסואלים אמנם מהווים רק אחוזים בודדים מהאוכלוסייה, אך אפשר למצאם במהלך כל ההיסטוריה האנושית, בכל מקום בעולם ובכל שכבות האוכלוסייה – מעצבי שיער, זמרים, לוחמי סיירת, כמרים ואחרים עשויים להיות הומוסקסואלים. התכונה מעולם לא נעלמה כליל, וכן לא התפשטה באוכלוסיית האדם. נוסף על כך, כאשר בוחנים אילנות יוחסין של גברים הומוסקסואלים, מוצאים שיש להם יותר קרובי משפחה הומוסקסואלים מצד האם מאשר מצד האב. החוקרים התייחסו גם למחקרים אחדים, ובהם מחקר שנערך ב-2004 בראשות קאמפריו צ'אני, שעל פיהם לאמהות של גברים הומוסקסואלים ולדודות שלהם מצד האם יש יותר ילדים, כלומר הן פוריות יותר, מאשר הדודות מצד האב ונשים



אחרי, עם סימון הסופרנובות



לפני

תצלום בתחום קרני ה-X (משמאל) ובאולטרה-סגול (מימין) של הגלקסיה NGC 2770. צולם בעת תצפית על הסופרנובה SN 2008uy, אשר במהלכה הופיעה הסופרנובה SN 2008D. התמונות צולמו בינואר 2008 על-ידי לוויין המחקר סוויפט של נאס"א

תצפית ייחודית זו היא בעלת חשיבות גם לעתיד: מכאן ואילך ידעו חוקרי הסופרנובות כי את השלב הראשון של התהליך יש לחפש באמצעות תצפיות בקרינת X. יש לקוות כי תגלית זו תאיץ את חקר הסופרנובות בשנים הקרובות. בשלבים הראשונים, הסופרנובה אמורה להפיק גם גלי כבידה חזקים (קיומם של גלי כבידה הוא חיזוי תיאורטי שטרם נצפה בפועל, וראו: ברק קול, "גלי כבידה: צלילים שמימיים", "גליליאו" 111) ושטף גדול של חלקיקי נויטרינו – שתי תופעות המעוררות עניין רב בעולם המדע, הן כשלעצמן והן במסגרת חקר הסופרנובות – ולכן יש ערך רב ליכולת לזהות מוקדם ככל האפשר את התרחשותן על מנת לנסות ולצפות בהן.

מיכל סחף |

ראייט (Wolf-Rayet), מהווים מוקד עניין עקב האפשרות כי הם הגורמים לתופעות המסתוריות של פרצי קרינת גמא, שמקורן אינו ידוע, הנצפות לעתים ברחבי היקום. אחת הסברות באשר למקור פרצי קרינת הגמא קושרת אותם להתפוצצות סופרנובות. הגלקסיה NGC 2770 נצפתה בעת התרחשות הסופרנובה 2008D גם באמצעות טלסקופ של קרני גמא (Swift Burst Alert Telescope), אך לא נמצא פרץ קרני גמא הקשור לאירוע, וסך כל האנרגיה שנפלטת בהתפוצצות הסופרנובה היה רק כאלפית מזו המאפיינת את פרצי קרינת גמא. אין בכך כדי לשלול את הקשר בין סופרנובות לבין פרצי קרינת גמא, אך אפשר להסיק כי לפחות עבור חלק מהסופרנובות, בעלות מאפיינים מסוימים, הקשר אינו מתקיים.

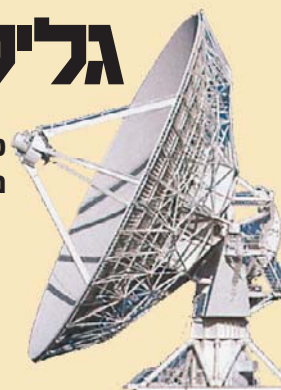
המשך בעמוד הבא ←



גליליאו

פורום "גליליאו" נועד לאפשר מפגש ודיון בטווח רחב של תחומי מדע ומחשבה - מגנטיקה עד תורת הקוונטים, מחורים שחורים עד פרקטלים. מדי חודש מארח הפורום מומחה בתחום מסוים, אשר כתב בגיליון האחרון. בואו לשאול, לשוחח ולענות.

www.ifeel.co.il/galileo





סופרנובה על חם

תצפית יחידה במינה מתעדת את הרגעים הראשונים של התפוצצות סופרנובה

כעת, לראשונה, זכו מדענים ללכוד את רגע הולדתה של סופרנובה, וחוקרים מכל העולם – ובהם פרופ' אלי וקסמן וד"ר אבישי גל-ים ממכון ויצמן למדע – התגייסו לעבודת התצפית ולפענוח הנתונים מן האירוע. הסופרנובה 2008D נתגלתה בינואר 2008 בגלקסיה NGC 2770, המרוחקת 90 מיליון שנות אור מכדור-הארץ. לוויין המחקר סוויפט של נאס"א, ששימש באותה עת את החוקרים אליסיה סודברג (Soderberg) ועידו ברגר (Berger) מאוניברסיטת פרינסטון לתצפית בסופרנובה אחרת באותה גלקסיה (SN 2007uy), קלט פרץ פתאומי של קרינת X. מאורע זה התגלה בהמשך כמסמן את ראשית התהוותה של סופרנובה. תצפית בלתי מתוכננת זו אפשרה לחוקרים להפיק מידע רב-ערך ונדיר על הרגעים הראשונים בתהליך הפיצוץ, שטרם נחקרו. פרץ קרינת ה-X בסופרנובה זו ארך דקות אחדות, והתרחש ככל הנראה בעת שגל ההלם מהקריסה, אשר נע החוצה, פרץ את מעטפת הכוכב.

במאמר שהתפרסם בכתב-העת *Nature* מספרים החוקרים, כי על פי המידע שנאסף בהתרחשות, נראה כי תהליך ההתפוצצות בפועל דומה למדי לתהליך שחזו המודלים התיאורטיים. התצפית בשעותיה הראשונות של הסופרנובה מלמדת על מאפייניו של הכוכב המתפוצץ: זהו כוכב דחוס, אשר רדיוסו כמיליון קילומטרים (לא גדול בהרבה מהשמש, אף כי הוא מסיבי ממנה), ורוח כוכבית חזקה שנפלטה ממנו סילקה את שאריות מעטפת המימן שהקיפה אותו. כמו כן היה אפשר להסיק רבות על אודות המתרחש בשלבים הראשונים של תנועת גל ההלם בכוכב הקורס. בשלבים מאוחרים מעט יותר נוספו לגילוי הראשוני תצפיות בטווח רחב של אורכי גל, אשר חשפו תהליכים שונים המתרחשים בחומר הנפלט בהתפוצצות. הכוכבים הגוססים, טרם קריסתם, המכונים כוכבי וולף-

כוכבים מסיביים מסיימים את חייהם בהתפוצצות דרמטית הקרויה סופרנובה. במהלך קיומו ממיר הכוכב יסודות קלים ליסודות כבדים יותר בתהליך של היתוך גרעיני, ובדרך זו מופקת אנרגיה. ואולם, ככל שהיסודות הופכים כבדים יותר, כמות האנרגיה שאפשר להפיק מהם קטנה. ברזל הוא היסוד האחרון בתהליך זה, שמעבר לו אין אפשרות להפיק אנרגיה מהיתוך גרעיני.

כוכבים קלים (פחות משמונה מסות שמש) אינם מגיעים כלל לשלב הברזל, ומסיימים את חייהם בדעיכה אטית כגופים קומפקטיים ההולכים ומתקררים, המכילים יסודות קלים יחסית, כמו פחמן וחמצן. גופים אלה קרויים ננסים לבנים. כוכבים מסיביים יותר מגיעים למצב שבו ליבת הברזל שלהם אינה עומדת כנגד משיכת הכבידה העצמית שלהם. בשלב זה הכוכב קורס תחת כבידתו העצמית, וגל ההלם הנוצר בקריסה זו מביא להתפוצצות שבה נפלטים קרינה וחומר, ונוצרים יסודות נוספים, כבדים יותר מברזל, שאילולא כן לא היו מצויים כמעט ביקומנו. התפוצצות זו מוכרת למדע זה שנים בשם "סופרנובה".

מאחר שאין סימנים מקדימים המאפשרים לחוקרים על פני כדור-הארץ לדעת כי בגלקסיה מרוחקת עומד כוכב דועך לסיים את חייו, לא היו עד כה נתונים מרגיעה הראשונים של ההתפוצצות. לרוב מתגלה הסופרנובה רק שבועות אחדים לאחר תחילתה, כאשר חומרים רדיואקטיביים שנוצרו בהתפוצצות מעוררים פליטה של אור בوهק מקרבת הכוכב שהתפוצץ. למען הדיוק, יש להדגיש כי הסופרנובה מתרחשת בפועל זמן רב טרם הגעת אותות הפיצוץ לכדור-הארץ, מאחר שהזמן הנדרש לקרינה כדי לחצות את המרחק שבין הסופרנובה לכדור-הארץ עשוי להיות ארוך מאוד (מאות אלפי שנים ואף מיליונים רבים). ואולם, לצורך פשטות הניסוח נתייחס כאן למועד הפיצוץ כפי שנצפה מכדור-הארץ.

לא הלילה, מותק; אני שודדת גנים

האם הרבייה האל-זוויגית של הרוטיפרים נשענת על קליטת DNA ממינים אחרים?

הזרים שמורים ברמה גבוהה, עוברים שעתוק וה-RNA שלהם עובר שחבור נכון. החוקרים הראו גם כי לפחות גן אחד מסוגל ליצור אנזים פעיל כאשר החדירו אותו לחיידק *E. coli*. אף שתופעה של מעבר גנים מאורגניזם לאורגניזם נצפתה בעבר בחיידקים, היא נדירה ביותר בבעלי-חיים. ה-DNA של החיידקים אינו נתון בתוך גרעין מוגדר, ומעצם היותם חד-תאיים הם יכולים לקבל או לנדב בנקל חומר גנטי זה לזה. בבעלי-חיים, לעומת זאת, ה-DNA שמור היטב בתוך גרעיני התאים. מעבר לכך, המידע הגנטי המועבר לצאצא שמור בתאי המין – הזרעון או הביצית – כאוצר יקר מפז.

סביר להניח שה"טריק" של הרוטיפרים קשור ליכולת מרשימה אחרת שלהם. הרוטיפרים הם מהשורדים הגדולים של הטבע. כאשר סביבת המחיה של היצורים הזעירים מתייבשת, גם הרוטיפרים מתייבשים. הם נכנסים למצב של חיות מושהית, שבמהלכה מתפרק ה-DNA לאלפי מקטעים נפרדים. עבור כל בעל-חיים רגיל, מצב כזה משמעו גזר דין מוות, אך עבור הרוטיפרים זהו רק אי-נוחות זמנית. ברגע שיחושו שוב במים מסביבם, תחל פעילות אנזימית בתוך התאים, שתחבר מחדש את מקטעי ה-DNA זה לזה, והרוטיפר כולו ישוב לפעילות מלאה בתוך שעות אחדות. כיום מוכר לפחות חלבון אחד ברוטיפר המונע מהאנזימים השונים להיהרס במהלך הייבוש. יכולת זו מאפשרת לרוטיפרים לעמוד גם בכמויות קרינה גבוהות יותר מכל בעל-חיים אחר. הקרינה מנתצת את ה-DNA שלהם לרסיסים, אך הם עדיין מסוגלים לשחזר אותו ברמה מספיק גבוהה של דיוק. ייתכן שתהליך פירוק ה-DNA מאפשר לגנים זרים להשתלב בחומר הגנטי של הרוטיפרים בתהליך השחזור. תיאורם של הרוטיפרים אמנם דומה כאילו הוא לקוח מתוך סיפור אימה או מדע בדיוני, אך לא נראה שיש לנו ממה לחשוש. נראה כי חלק מהגנים הזרים נרכשו לפני זמן רב, מכיוון שהם עברו אבולוציה שונה מזו של הגנים החיידקיים המקוריים. סביר להניח שחדירת גן חדש לגנום של רוטיפר היא אירוע נדיר ביותר, המתרחש אחת לעשרות אלפי או אף מאות אלפי שנים. ייתכן כי הגנים הזרים הללו הם המקור ליכולתם יוצאת הדופן של הרוטיפרים לשרוד במשך עשרות מיליוני השנים האחרונות בלא זְכָר אחד לרפואה.

רועי צזנה |

בשנת 1702 שאב המיקרוסקופאי הנודע אנתוני ון לוונהוק (Van Leeuwenhoek) טיפת מים מהמרזב, וגילה בתוכה יצורים משונים. הרוטיפרים (Bdelloidea) שראה הם בעלי-חיים מיקרוסקופיים רב-תאיים, בעלי ראש וזנב גמישים, המסוגלים לשחות ולזחול. ון לוונהוק דיווח על ממצאיו לאגודה הבריטית המלכותית, וחזר לנתח דגימות אחרות. הוא לא היה יכול לדעת, כי האורגניזמים התמימים-למראה הם למעשה שודדי גנים, וחמור מכך – הם מתזרים לחלוטין מיחסי מין.

חוקרים שהמשיכו את עבודתו של ון לוונהוק גילו להפתעתם כי כל הרוטיפרים, בלא יוצא מן הכלל, שייכים למין הנקבי. ביציותיהן של הנקבות מתפתחות לעוברים מבלי שיפרו אותן זכרים – אלה אינם קיימים כלל. במינוח מדעי: זוהי רביית בתולין, או פֶּרְטֶנוּגְנֶזָה, והיא משותפת למינים רבים של בעלי-חיים, החל מתולעים וחרקים, דרך זוחלים ודגים מסוימים וכלה, במקרים נדירים, בעופות.

במינים-ביולוגיים אלה קיימת אמנם רביית בתולין, אך היא מלווה בדרך-כלל בנוכחות של זכרים, אשר מסוגלים להעשיר את המגוון הגנטי ובכך לסייע בהתמודדות עם מצבים לא-שגרתיים. שיתוף הפעולה הפורה בין הזכרים לנקבות מהווה, לפיכך, שיטת רבייה מוצלחת במיוחד, וכל מין-ביולוגי שאינו ניחן בה צפוי להיכחד במוקדם או במאוחר. ועם כל זאת, נקבות הרוטיפרים שורדות ומשגשגות בנזירותן כבר למעלה מ-80 מיליון שנה, עובדה הגורמת כאבי ראש קשים לביולוגים אבולוציוניים ברחבי העולם.

לתופעה מוזרה זו, המנוגדת לכל הציפיות, הוצעו הסברים שונים (לאחד מהם ראו: נעם לויטן ודינה וולדרסקי, "למה להרביע כשאפשר לרבע?", מדור החדשות, "גליליאו" 118). לאחרונה נמצא הסבר נוסף, התואם את מוזרותם הכללית של הרוטיפרים. במאמר שהתפרסם במאי האחרון בכתב-העת המדעי *Science*, מדווחים יוג'ין א. גלדישב (Gladyshev) ועמיתיו מאוניברסיטת הרווארד כי הקוד הגנטי של הרוטיפרים גדוש בעשרות גנים ממקור חיידקי, פטרייתי וצמחי. אחד הגנים הללו, לדוגמה, מעורב בסיתות חלבונים לא-ריבוזומית – תהליך המתרחש בחיידקים ובפטירות בלבד. לא ברור עדיין מה תפקיד גן זה ברוטיפרים, אך החוקרים הצליחו לקבוע כי חלק מהגנים





זיקנה שיש בה לחלוחית

נביטתו של זרע תמר ארכאי מימי מצדה



א. הזרעים שהתגלו במצדה טרם הנביטה. ב. השתיל מתושלח בגיל 3 חודשים, והתפתחותו נורמלית. גובהו 15 ס"מ. ג. השתיל מתושלח בן 7.5 חודשים וגובהו 31 ס"מ. חלק מעליו הלינו. ד. השתיל מתושלח בן 26 חודשים וגובהו 121 ס"מ, והתפתחותו תקינה לחלוטין.
תצלומים: G. Eisner

צמחי מרפא בבית-הספר לרפואה בהדסה עין-כרם, את חמשת זרעי התמר שנבדקו, להנבטה. ד"ר יובל כהן, חוקר במכון וולקני במנהל המחקר החקלאי שבמשרד החקלאות, מוסר כי לצורך ההנבטה טופלו הזרעים בהורמונים מעודדי נביטה ומעודדי צמיחת שורשונים. לאחר טיפולים אלה, שנמשכו ימים אחדים, הועברו הזרעים לעציץ; ולאחר הנביטה הועבר השתיל הצעיר לחממות שבקיבוץ קטורה לצורך המשך גידול.

ממצאי המחקר פורסמו ביוני השנה בכתב-העת המדעי *Science*, ומהווים פריצת דרך בחקר הזרעים העתיקים. "כולנו סקרנים לראות במו עינינו עד כמה העץ הזה דומה לעצי תמר אחרים הגדלים היום ברחבי ישראל והמזרח הקרוב", אומר פרופ' כסלו. זרע התמר שנבט הוא שיאן העולם בנביטה מזרע עתיק. בשיא הקודם החזיק צמח לוטוס, שנבט לאחר 1,300 שנה בלבד.

עידן פייביש |

צוות מדענים מישראל ומשווייץ הצליח להנביט זרע תמר כבן 1,930 שנה, שהתגלה בחפירות ארכיאולוגיות. את החפירות ניהל פרופ' יגאל ידן במרומי מצדה, בשנות השישים של המאה ה-20. כיום מדובר בשתיל מפואר בעל שבעה עלים – שבע כפות תמרים, הקרוי בפי החוקרים "מתושלח".

בשנים שעברו מאז החפירות שבהן התגלה, נשמר זרע התמר, יחד עם זרעים נוספים מאותן חפירות, באוצר הזרעים שבמעבדה לבוטניקה ארכיאולוגית בפקולטה למדעי החיים באוניברסיטת בר-אילן. את מאגר הזרעים ייסד ומנהל פרופ' מרדכי כסלו, ובו למעלה מ-10 אלפים דוגמאות של יותר מ-90% מצמחיית ישראל וסביבתה. זהו גם אוסף הזרעים העתיק הגדול ביותר במזרח התיכון, ואחד הגדולים בעולם כולו.

עוד בטרם נעשו ניסיונות ההנבטה, נשלחו חמישה זרעי תמר, שהתגלו באותן חפירות ארכיאולוגיות, לתארוך המבוסס על פחמן-14 (פחמן המכיל 14 נוקלאונים – פרוטונים וניטרונים – בגרעין האטום, במקום 12 שבאיזוטופ הפחמן הנפוץ). שיטת תארוך זו מבוססת על העובדה שבמהלך חיי הצמח, האיזוטופ נטמע בו, ואחר-כך עובר לגופם של אוכלי הצמחים הניזונים ממנו ושל אוכלי הבשר האוכלים את אוכלי הצמחים. במהלך החיים, ריכוזו היחסי של האיזוטופ בגוף חי שווה לריכוזו היחסי באוויר. עם מותו של היצור – או במקרה של זרע התמר החי, הקפאת המטבוליזם שלו – האיזוטופ הרדיואקטיבי הולך ומתפרק על פי זמן מחצית החיים האופייני לאותו איזוטופ.

לאחר קבלת האישור הרשמי על תארוך זרעי התמר מתקופת ימי מצדה, מסר כסלו לד"ר שרה סלון, חוקרת

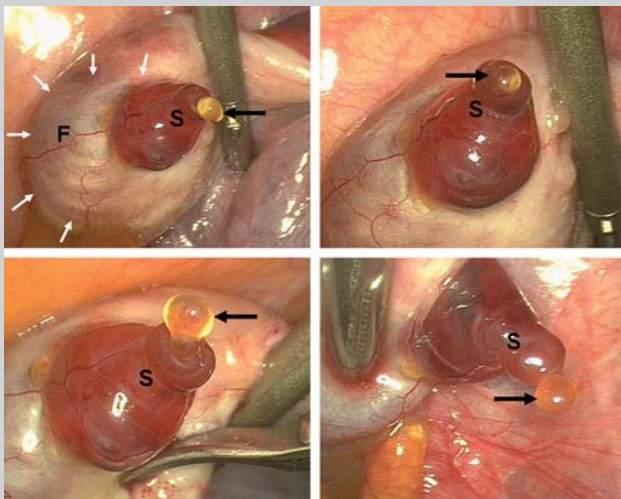
ביוץ בעין המצלמה

ביוץ הוא החריגה של ביצית בשלה מהזיקי שבן התפתחה בשחלה. במהלך הביוץ מופיע פתח בדופן הזיקי, המאפשר את יציאת הביצית ממנו אל חלל הבטן ומשם כרגיל לחצוצרה. אף שמדענים הצליחו לצפות בביוץ בבעלי-חיים שונים, כמעט אין ידוע דבר על התרחשות הביוץ באופן טבעי בגוף האדם. כל התצלומים – הנדירים – של ביוץ באדם שצולמו עד עתה הם מטושטשים ולא ברורים. כעת, ביצית היוצאת מן השחלה בשעת ביוץ נלכדה במקרה בעין מצלמתו של המנתח ז'אק דונה (Donnez) מהאוניברסיטה הקתולית של לֵוֶן בבריסל, בלגיה. התצלומים, שצילם דונה בעת שהתכוון לניתוח כריתת רחם באשה בת 45, הם התצלומים החדים ביותר שהתקבלו אי-פעם של תהליך הביוץ הספונטני באשה. הביוץ המצולם נמשך 15 דקות, קצב אטי בהרבה מהמהירות שבה נהוג לחשוב שהביוץ מתרחש.

בתצלום נראים טיפה צהובה צמיגה (חץ שחור), הזיקי הבוגר (F, חצים לבנים) והמקום (S) שממנו יוצאת הביצית. הטיפה הצהובה (שגודלה כגודל הנקודה בסוף משפט זה) כוללת בתוכה את תא המין הנקבי (תא הביצית), המוקף בתאי נושא הביצית (cumulus oophorus) ובכתר ההיקפי (corona radiata) המורכב מאלפי תאים עוטפים קטנים (תאי גרנולוזה).

התצלומים פורסמו בכתב-העת *Fertility and Sterility*.

| נעם לויטן ודינה וולדרסקי



כריות האוויר של אוריון

ניסוי בקנה מידה מלא של מערכת כריות האוויר לחללית העתיד של נאס"א, אוריון (Orion), נערך לאחרונה במתקן של סוכנות החלל האמריקנית. במסגרת הניסוי נבחנה מערכת של כריות אוויר שנועדו לשכך את נחיתת החללית, המיועדת לטוס אל הירח בשנת 2018, בשובה אל כדור-הארץ. החללית אוריון, הדומה בצורתה לחללית אפולו, תנחת בדרכה חזרה באמצעות מצנחים, על היבשה. על מנת להקטין את עוצמת הפגיעה בקרקע, יתנפח מערך של כריות אוויר בתחתית החללית, לאחר הפלטת מגן החום שלה. עד כה, לא עשו חלליות מאוישות שימוש בטכנולוגיה זו, אף שנאס"א משתמשת בכריות אוויר להנחת חלליות מחקר בלתי מאוישות על מאדים מאז שנת 1997. החללית הרוסית סויוז (Soyuz) מרככת את נחיתתה באמצעות עשרות מנועים רקטיים קטנים, המופעלים פחות משנייה בטרם תפגע בקרקע.

בניסוי שנערך, הוטל גוף ניסוי המדמה את החללית ומשקלו כמשקל החללית העתידית (ומשקלם של ארבעה אנשי צוות) – 7,257 ק"ג – ממתקן ניסוי. בהטלה הראשונה נפלה החללית המדומה מגובה של כ-13 מטרים. המתקן של נאס"א מסוגל להפיל דגמי ניסוי מגובה של עד 73 מטר, תוך מדידה מדויקת של כלל הכוחות הפועלים על הדגם הנבדק.

| טל ענבר



מהנדסי נאס"א בוחנים דגם ניסוי המצויד במערכת שיכוך הנחיתה המיועדת לחלליות מסדרת אוריון. באדיבות נאס"א

המשך בעמוד הבא ←





פחות אבל עוד כואב

PNAS, אחד מקולטני הכאב שמפעילים חומרי הרדמה הכללית הוא הקולטן TRPA1. קולטן זה אחראי, בין היתר, לתחושת החריפות שאנו חשים בעת אכילת חרדל או ואסאבי, והוא שייך לאותה משפחה של הקולטן המגיב לקפסאיצין, המרכיב העיקרי בפלפל חריף.

אהרן ועמיתיו בדקו תחילה את תגובת הקולטן לחומרי הרדמה הכללית השונים בתרבויות תאים, ולאחר מכן בעכברים. התברר שבעכברים בלא הקולטן TRPA1 אין התנהגויות האופייניות לתחושת הכאב בעקבות שימוש בחומרים מרדימים.

מאחר שחומרי הרדמה הכללית הללו מגבירים את תגובת קולטני הכאב, הם מסוגלים לגרום להפרשה מוגברת של שליחים עצביים באזורים שנפגעו במהלך הניתוח. הפרשה זו גורמת, כאמור, לכאב מוגבר, וכן לתגובה דלקתית שמקורה במערכת העצבים. אכן, במחקר של אהרן ועמיתיו התפתחה דלקת בעכברים שטופלו בחומרי הרדמה שמשפיעים על TRPA1, ולא בכאלו שטופלו בחומרי הרדמה אחרים.

מאחר שחומרי הרדמה המשפיעים על קולטן ה-GABA משפיעים גם על קולטני הכאב בתאי העצב ההיקפיים, קשה לפתח חומרי הרדמה המבטלים כאב לחלוטין. מכל מקום, פיתוח תרופות בעלות השפעה מעכבת על קולטני TRPA1 ושילובן בתהליך ההרדמה יוכל לסייע לשכך כאבים שלאחר ניתוח שנעשה בו שימוש בהרדמה כללית, וכן להקטין את הסיכון לדלקת.

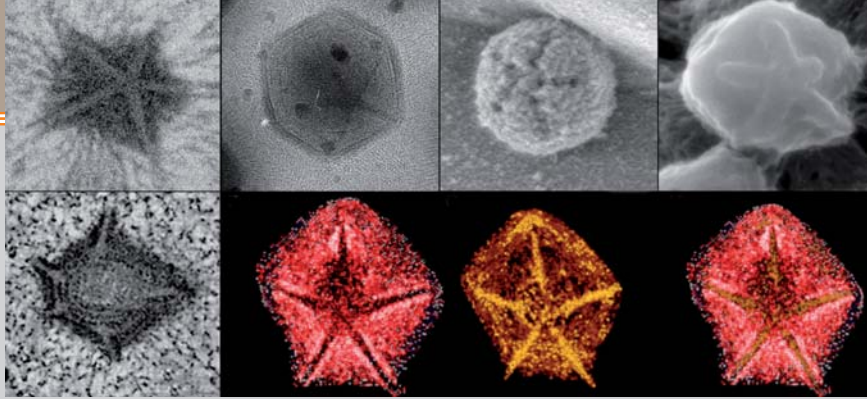
| דינה וולדרסקי ונעם ליתן

בכל שנה מתבצעים יותר מ-100 אלף ניתוחים בהרדמה כללית ברחבי העולם. החומרים המשמשים להרדמה כללית הם חומרים המדכאים באופן הפיך את פעילותה של מערכת העצבים המרכזית. הדיכוי נובע מהשפעה שיש לחומרים אלה על קולטנים לשליחים עצביים (נוירורנסמיטרים), ובמיוחד על קולטן למוליך העצבי GABA, שהוא השליח העצבי המעכב העיקרי במערכת העצבים המרכזית. הפעלת קולטן זה על-ידי חומרי הרדמה גורמת לירידה בפעילות חלקים במערכת העצבים המרכזית ולאבדן ההכרה.

ואולם, לאחר שפגה השפעת חומר ההרדמה, במקרים רבים מנותחים חשים כאבים.

עד כה היה מקובל לחשוב, כי מקור הכאבים שחשים המנותחים בתקופת ההחלמה הוא רק בהגלדת פצעי הניתוח עצמם. אמנם, היה ידוע כי אופן מתן החומר המרדים (בהזרקה או בשאיפה) עלול לגרום כאב במקום ההזרקה או בדרכי הנשימה, אך עתה מחקר חדש חושף את העובדה המפתיעה כי החומרים המרדימים עצמם מגבירים את הכאב.

התברר, כי בעוד שפעילות החומרים המרדימים על הקולטנים ל-GABA במערכת העצבים המרכזית גורמת לאבדן הכרה ולחוסר כאב, השפעתם על קולטנים בממברנות של תאי עצב היקפיים האחראים לחישת כאב דווקא יוצרת או מגבירה את תחושת הכאב. על פי מחקר שערכו ג'ררד אהרן (Ahern) ועמיתיו מאוניברסיטת ג'ורג'טאון שבוושינגטון, ושהתפרסם בכתב-העת



נגיפי mimivirus מבעד למיקרוסקופ אלקטרוני. באדיבות מכון ויצמן למדע

Mimivirus - הרבה יותר מנגיף

אלה בתאי אמבה, ובעיקר את השלב הראשוני – שבו מוחדר ה-DNA הנגיפי אל תוך התא המאכסן. מינסקי וקבוצתו גילו שבניגוד לנגיפים אחרים, המשתמשים בפתח יחיד בקופסית הנגיף הן להזרקה ה-DNA למאכסן בעת ההדבקה והן לכניסת ה-DNA לקופסית בזמן "הרכבת הצאצאים", הרי שב-APMV יש שני פתחים שונים למטרות אלה. הפתח האחד נפתח כלפי חוץ וצורתו צורת כוכב, והוא המאפשר את יציאת ה-DNA הנגיפי דרך תעלה הנוצרת בממברנת התא המאכסן; והאחר, שמבנהו שונה, ממוקם מולו בקופסית. שני הפתחים השונים "נחשפים" כתוצאה משינוי במבנה המרחבי של קופסית הנגיף. ה-DNA הנגיפי נארז בקופסית כשהוא דחוס במבנה כדורי, ולא כסליל DNA פרוש, כפי שנעשה בנגיפי DNA אחרים, שאורך ה-DNA שלהם קצר בהרבה. החוקרים סבורים ששנוי זה נובע מכמות ה-DNA הנגיפי המועברת. "מארז" ה-DNA משתחרר מהקופסית בגלל הפרשי לחצים הנוצרים עקב פתיחתו הפתאומית של פתח הכוכב. לא ברור עדיין מה המנגנון האנרגטי המאפשר את כניסת ה-DNA של ה"צאצאים" דרך הפתח האחר. גודל נגיפים אלה יקל בוודאי את מחקרם, אך עקב ההבדלים המשמעותיים בינם לבין שאר הנגיפים, הם לא יוכלו לשמש כמודל כללי לחקר נגיפים.

לקריאה נוספת:

הודעה לעיתונות של מכון ויצמן למדע:

<http://www.weizmann.ca/files/Minsky-PR-5%2008.pdf>

המאמר של קבוצתו של פרופ' מינסקי ב-PLoS Biology:

<http://biology.plosjournals.org/perlserv/?request=get-document&doi=10.1371%2Fjournal.pbio.0060114&ct=1>

ד"ר דרור בר-ניר |

אחד ההבדלים הבולטים ביותר בין הנגיפים לחיידקים הוא הגודל (יש כמובן הבדלים אחרים – משמעותיים הרבה יותר). קוטרו של מרבית החיידקים הוא 0.5-5.0 מיקרומטר (500-5,000 ננומטר), ואילו קוטרו של מרבית הנגיפים הוא בטווח של 20-200 ננומטר, אף שיש יוצאים מן הכלל. עד לפני זמן לא רב נחשבו נגיפי האבעבועות למיניהם (שחורות, הקוף, הבקר – poxviridae), שהם משפחת נגיפים עטופים בעלי DNA דו-גדילי, שקוטרו מעל 300 ננומטר, לנגיפים הגדולים ביותר. (נגיף אבעבועות הרוח, *Varicella zoster*, אינו שייך לקבוצה זו אלא למשפחת נגיפי ההרפס). בשנת 1992, במחקר על חיידקי *Legionella*, המתאכסנים כרגיל באמבות מהמין *Acanthamoeba polyphaga*, התגלו נגיפים עירומים (חסרי מעטפת ליפידית שמקורה במאכסן) ענקיים ולא-מוכרים, שייטכן שהם בין הגורמים לדלקות הריאה, שעדיין לא ידוע הגורם להן בבני-אדם. בתחילה חשבו שהם חיידקים, וזאת בשל קוטרום – 800 ננומטר (כמו סטרפטוקוקים!) ובשל גודל הגנום שלהם (1.2 Mb, המקודד למעלה מ-900 חלבונים). אף ניתן להם שם חיידקי – *Bradfordcoccus*, על שם המחוז באנגליה שבו נמצאו. רק ב-2003 התברר לקבוצתו של ברנרד לה-סקולה (La Scola) באוניברסיטת מרסיי בצרפת, שמדובר בנגיפים. הנגיפים נקראו Mimiviruses (מהמילה האנגלית Mimic – לחקות). מורכבות הגנום הנגיפי – אורך הרצף וכמות הגנים – הניעה חלק מהחוקרים להציע להגדיר אותם כקבוצה חדשה לגמרי של יצורים – Giruses – שהם שלב ביניים בין נגיפים לטפילים תאיים מורכבים יותר.

כיום מוגדר נגיף אחד בסוג Mimivirus, המכונה, על שם מאכסנו, *Acanthamoeba polyphaga mimivirus* (APMV). במעבדתו של פרופ' אבי מינסקי (Minsky) מהמחלקה לכימיה אורגנית במכון ויצמן למדע חוקרים, גם באמצעות תצלומים במיקרוסקופ אלקטרוני, את מחזור החיים של נגיפי ענק

המשך בעמוד הבא ←





כדורים על מאדים

מתקנים כדוריים קלים יחקרו את פני כוכב-הלכת

מתכת חלול, שיימתח מצדו האחד של הכדור לצדו האחר. המטוטלת תוזז באמצעות מנוע אל כיוון התנועה הרצוי. תנועתה לכיוון מסוים תזיח את מרכז המסה של הכדור, וכך תאלץ אותו לנוע בכיוון זה.

מכשיריו השונים של המתקן דמוי הכדור, כגון מצלמות וחיישנים, יימצאו בתוך הציר החלול, שעליו תנוע המטוטלת. את הציר הזה, על המכשירים שבו, יהיה אפשר לייצב ביחס לפני הקרקע על פי עקרון הפלס. פני הכדור יהיו מכוסים באלקטרודות שיוכלו לזהות תכונות חשמליות של פני השטח שעליו הוא נע, כגון מוליכות חשמלית.

את האנרגיה לתפקודיו, כגון תנועתו והפעלת חיישניו, יקבל הכדור מתאי שמש שיימצאו על פני השטח שלו. כדי לאפשר להם להיות נקיים מאבק, על מנת שיהיו יעילים בגלגול אנרגיית השמש לאנרגיה חשמלית, ייעשה שימוש במנקה אבק על-קולי. מנקה האבק יגרום לתנודות של מעטפת הכדור, שיגרמו להשלכת האבק ממנה.

הצוות המפתח רואה לנגד עיניו שתי דרכים שבהן כדורים מנופחים אלה עשויים לשמש לחקר מאדים. האחת היא כאמצעי משלים לרכבי השטח הגלגליים שישוטטו על פני מאדים. רכבי השטח יסיירו על פני מאדים, כפי שהם עושים כיום, ויסתייעו בעת הצורך בכדורים, שאותם ישלחו מתוך הרכב לאחר שינופחו. הכדורים הקטנים והגמישים יוכלו לנוע על מגוון סוגי קרקע ובמהירות של עד שלושים קילומטרים לשעה, ובכך ירחיבו את יכולותיהם של רכבי השטח. דרך שנייה היא ניפוח הכדורים בעודם בחללית החגה מסביב לכוכב-הלכת, ושיגורם מבעד לאטמוספירה אל פני הקרקע.

יורם אורעד |

כלי הרכב הגלגליים המשמשים לחקר מאדים זה שנים רבות עושים מלאכה מצוינת בסיור על פני שטח כוכב-הלכת. ואולם, אחת ממגבלותיהם של כלי הרכב הגלגליים היא המקום, אף אם הקטן, שהם תופסים בתוך חללית-האם הנושאת אותם אל כוכב-הלכת האדום.

כדי לפתור את בעיית המקום, וכן על מנת לחסוך באנרגיה, מפתחת לאחרונה קבוצה של מהנדסים רעיון שמהותו היא כדורים קלים, ניתנים לניפוח, שישמשו לסיוורים על פני מאדים וכוכבי-לכת אחרים. את הרעיון מקדמת קבוצה בראשות פרדריק ברוהן (Bruhn) ממכון אנגסטרום לתעופה וחלל באופסלה שבשבדיה. צוותו של ברוהן מורכב ממהנדסים מאוניברסיטת אופסלה ומהמעבדה להנעה חללית של נאס"א בפסדינה, קליפורניה, ארצות-הברית. לדברי ברוהן, כדורים מנופחים אלה יהיו קלים מאוד, יוכלו לנוע למרחקים ארוכים, יזדקקו לאנרגיה מועטה מאוד ויהיו זולים למדי.

הקבוצה מתכננת מתקן בצורת כדור, הניתן לניפוח לקוטר של כשלושים סנטימטרים. הכדור יהיה עשוי ממעטפת גמישה וחזקה מאוד, המסוגלת לעמוד בטמפרטורות גבוהות. בתוכו תימצא מחסנית של גז קסנון, שינפח את הכדור כאשר ישתחרר מן המחסנית. במצבו הבלתי מנופח, יתפוס הכדור רק מחצית מנפחו כאשר הוא מנופח, ובכך ייחסך מקום בחללית. הכדור יהיה גם יעיל יותר מבחינה אנרגטית מרכבי השטח המשמשים כיום לחקר מאדים. זאת משום שבזמן תנועתו, תמיד רק נקודה אחת שלו תיגע בפני הקרקע, דבר שיפחית את החיכוך עם הקרקע.

תנועת הכדור תתאפשר בזכות מטוטלת שתנוע על ציר



אימג'בנק / GettyImages

המשך בעמוד הבא ←





דיוק תפישתי קובע אם נסתכן או נלך על בטוח

ולא על הכפתור שנתן בוודאות 3. כלומר, הם הראו "אפקט סיכון", ונטו דווקא לאפשרות שהניבה רווחים גדולים יותר בטווח ארוך, אך היתה ודאית פחות. מדוע?

פרופ' ערב הציג את התעלומה הזאת לעמיתיו הזואולוגים, פרופ' ארנון לוטס מאוניברסיטת תל-אביב וד"ר שרוני שפיר מהפקולטה לחקלאות ברחובות, והיא הובילה למחקר חדשני ומרתק שפורסם בחודש יוני בכתב-העת *Nature*. המחקר, שבביצועו השתתפו גם תלמידי המחקר טלי רייך וארוז צור, מציע פתרון לסתירה-כביכול שבין שני האפקטים. קצה החוט לפתרון היה היכולת של בני-האדם לדיוק בתפישת מספרים. במילים פשוטות, כבני-אדם אנחנו יכולים להבחין בבירור בין תגמול של 3 ובין תגמול של 4, כי קל לנו לתפוש ש-4 גדול מ-3. לעומת זאת, חולדות אינן יודעות לספור ולכן אינן יכולות לתפוש במדויק את התגמול, ועליהן ללמוד עליו ולזכור אותו באמצעות ניסוי וטעייה. האם היכולת לשנות את הדיוק התפישתי יכולה להפוך אפקט ודאות לאפקט סיכון, או להפך?

פרופ' לוטס ועמיתיו ניסו לענות על שאלה זו באמצעות סדרת מחקרים שערכו בדבורים ובבני-אדם. בניסוי שנערך בדבורים, ניתנה לדבורים האפשרות לבחור בין שתי תמיסות בעלות ריכוזים שונים של סוכר. כאשר בחרו בתמיסה המתוקה יותר, היא ניתנה להן בהסתברות של 0.8, ולעומת זאת, בהסתברות של 0.2, לא קיבלו שום גמול. כאשר בחרו בתמיסה המתוקה פחות, היא ניתנה להן תמיד. היכולת להבחין בין התמיסות היתה קלה, בינונית או בלתי אפשרית, על פי מידת הריכוז של הסוכר בתמיסה (קלה) – 10% לעומת 5%; בינונית – 6.7% לעומת 5%; בלתי

האם חולדות מקבלות החלטות כמו בני-אדם? מסתבר שלפעמים כן: גם חולדות, כמו בני-אדם, אינן מקבלות תמיד את ההחלטה שתניב את התועלת המרבית. בסדרה מפורסמת של ניסויים הראו דניאל כהנמן ועמוס טברסקי שבניגוד לתורת "תוחלת התועלת", הצופה החלטות הגיוניות מבחינה מתמטית, בני-אדם מראים "אפקט ודאות". כלומר, כאשר מתארים להם שתי חלופות מילוליות, הם יעדיפו את האפשרות הבטוחה יותר, אף שהרווח הצפוי ממנה לאורך זמן הוא נמוך יותר. למשל, אנשים יעדיפו רווח ודאי של 3,000 שקלים על פני סיכוי של 0.8 לרווח של 4,000 שקלים. בתחילת שנות התשעים, מצאה קבוצת חוקרים אמריקנים בראשות דון מק'דונלד (MacDonald) שגם חולדות מראות אפקט דומה. כאשר מאפשרים לחולדות לבחור בין סיכוי קטן לתגמול גדול ובין תגמול ודאי קטן, הן מעדיפות את האפשרות הבטוחה יותר (כלומר, תגמול ודאי קטן), אף שבממוצע אפשרות זו היא רווחית פחות.

האם אפקט הוודאות פועל תמיד? חולדות אמנם מקבלות לפעמים החלטות כמו בני-אדם, אך פרופ' עידו ערב מהטכניון ועמיתיו מצאו שבני-אדם לא תמיד מקבלים החלטות כמו חולדות. כאשר הוצגו בפני נבדקים מצבים מקבילים לניסוי של כהנמן וטברסקי, אולם הפעם התנאים לא תוארו באופן מילולי, התגלה דווקא אפקט הפוך. בניסוי אפשרו לנבדקים לשחק ב"מכונת כסף" וירטואלית, וביקשו מהם לקבל החלטה על סמך בחירה בין שתי אלטרנטיבות בדרך של ניסוי וטעייה, בלי שסיכויי התגמול פורטו בפניהם במפורש. הנבדקים בניסוי זה הראו נטייה ברורה לסיכון – הם העדיפו ללחוץ על הכפתור שבהסתברות של 0.8 נתן 4



על דבורים ואנשים

פרופ' לוטם, למה בחרתם לחקור דווקא דבורים?

מכיוון שהדבורה כל-כך רחוקה מבחינה אבולוציונית מהאדם, התוצאות שקיבלנו מרתקות, משום שהמשמעות שלהן היא שמודל דומה לקבלת החלטות התפתח בשני מסלולים אבולוציוניים מקבילים. נוסף על כך, אנשים לא יודעים זאת, אבל כשליש מתנובת החקלאות בעולם תלויה באופן ישיר או עקיף בהאבקת דבורים, ולכן ליכולת שלנו להבין כיצד דבורים מתנהגות ומקבלות החלטות יכולות להיות השלכות בתחום זה.

ברור לנו שדבורים אינן מדעניות. מדוע בני-אדם לא התנהגו בניסוי כמו מדענים?

כאשר מציגים לבני-אדם שאלה במילים, הם שואלים את עצמם "מה כדאי לי?". אולם אם לא מציגים להם את השאלה במילים, אלא אומרים להם: "יש כאן שני כפתורים, תבחר על מה לחוץ", הם מנסים ללמוד מה עדיף ולזכור זאת. לו היו יודעים שהתנאים לא משתנים כל המשחק, אולי היו עושים חקירה מסודרת. אבל הם לא יודעים זאת, ולכן הם מנסים אפשרויות שונות ומפתחים העדפה, וכנראה משתמשים בכללי התנהגות בסיסיים שדומים לאלו שבעלי-חיים משתמשים בהם.

וזה נכון גם לחיים?

חיות לומדות רק מניסיון. לבני-אדם יש ידע תיאורטי, אבל יש גם ידע מניסיון. פעמים רבות אנחנו בעצמנו לא יודעים את ההסתברויות להתרחשות של אירועים, ולכן אנחנו מחליטים לפי ניסיון מצטבר. כולנו מודים שאנחנו מקבלים החלטות לפי תחושה או אינטואיציה שפיתחנו מניסיון. מקרה קלאסי הוא ההחלטה באיזה כביש לנסוע. איילון מהיר אבל פקוק, והכביש הישן לחיפה מלא ומזוהר. במה כדאי לבחור? הדרך שבה אנשים מחליטים

במקרה זה היא לפי הניסיון. אנחנו צופים שכמו דבורים, הם יפתחו העדפה ללכת עם מה שיותר טוב רוב הפעמים. הם לא יבדקו בהכרח בכמה יותר טוב, אלא בעיקר יזכרו מה היה יותר טוב רוב הפעמים.

אז במה קבלת ההחלטות שלנו טובה יותר מזו של דבורים או חולדות?

לנו יש יכולת הבחנה חדה הרבה יותר, כי אנחנו יכולים לייצג הבדלים באמצעות סימנים. חולדות ודבורים יכולות להבחין בין "יש" ובין "אין", או בין "הרבה" ובין "מעט". בני-אדם יכולים להבחין בין 4 ל-3, וזו הבחנה עדינה יותר, שיכולה לתת לנו יתרון בקבלת החלטה (אך אולי גם להטעות אותנו במצבים מסוימים).

ומה יכולים להיות היישומים של ההבנה הזאת בחיי יומיום?

כיוון חשוב אחד הוא העובדה שלעתים אנחנו ממעיטים בחשיבות של אירועים נדירים. אם לא קיבלתי לאחרונה קנס על כך שעברתי באור אדום, אני אמשך לעבור באור אדום, כי אני זוכר שברוב הפעמים לא קרה לי כלום ואפילו חסכתי זמן. כדי לזכור אחרת, צריך מערכת אכיפה שתדאג לכך שפעמים רבות יותר, כאשר אעבור באור אדום, אקבל קנס. כולם מכירים את התיאוריה שלפיה לא שווה להפסיד חיים ברגע, אך כנראה בלי התנסות מעשית זה לא עובד. כיוון חשוב אחר הוא בעידוד של אנשים לקחת סיכון, למשל כשרוצים לגמול אנשים מפחדים או לקחת יוזמה עסקית. כאשר אנשים נוטים לשמרנות ולבסוף מעזים לקחת סיכונים, חשוב אולי לתת להם משוב ברור שמבהיר שלקיחת הסיכון אכן היתה כדאית. משוב כזה יכול לבנות ביטחון ולעודד אותם לקחת סיכונים נוספים בעתיד. ■





להבחין קלה, בני-אדם, כמו דבורים, מעדיפים לקחת סיכון. לבני-אדם קל להבחין בין תגמול של 4 לתגמול של 3, ולכן במקרה הזה התקבל אפקט סיכון.

כיצד אפשר לגרום למעבר מאפקט סיכון לאפקט ודאות? לוטם ועמיתיו הצליחו לעשות זאת על-ידי הצגה חזותית של נקודות. בגרסה אחרת של הניסוי, כפתור אחד הניב בוודאות 30 נקודות, והכפתור האחר הניב 40 נקודות בהסתברות של 0.8. הנקודות פוזרו אקראית, בתבניות שונות. כלומר, תנאי התגמול לא השתנו, אך הוצגו באופן אחר. אופן ההצגה הזה הניב אפקט ודאות, משום שהפעם היכולת להבחין היתה קשה – לבני-אדם קשה להבחין בין תבנית אקראית של 30 נקודות לתבנית אקראית של 40 נקודות. כמו הדבורים, כאשר קשה להבחין בין הגמול הגבוה לגמול הנמוך יותר, בני-אדם מעדיפים "ללכת על בטוח".

בתנאים אחרים של הניסוי, התברר שאפשר לשלוט באפקט זה על-ידי שינוי אופן ההצגה. למשל, כאשר הנקודות הוצגו בקבוצות של 5, כך שהיה קל לתפוש שיש הבדל בין קבוצה של 40 נקודות לקבוצה של 30 נקודות, אפקט הוודאות התבטל. כאשר הוצגו תבניות אקראיות של 60 נקודות (בתנאי של הסתברות 0.8) לעומת 30 נקודות (בתנאי הוודאי), התקבל אפקט סיכון, משום שלנבדקים היה קל מאוד להבחין בין שתי התבניות.

ממצאי המחקר מורים שהנטייה לקחת סיכון או להיצמד לוודאות אינה בהכרח תכונה מולדת או נרכשת, אלא נטייה המשתנה בהתאם להתנסות הנצברת. בני-אדם, כמו דבורים וכמו חולדות, יעדיפו ודאות או סיכון בהתאם לאופן שבו הם תופשים את ההתנסות החוזרת עם האלטרנטיבות השונות. תצוגה לא-ברורה של תגמולים גורמת לכך שהתגמול ה"מסוכן" אינו נתפש כגדול יותר מהתגמול הוודאי, ולכן נוצרת נטייה להעדיף ודאות במחיר של פחות תועלת; לעומת זאת, תצוגה ברורה של תגמולים עוזרת להבחין איזה מהם גדול יותר, ובמקרה כזה אנחנו ובעלי-חיים אחרים מוכנים לקחת סיכונים כדי להרוויח יותר.

נפתלי ישראלי

אפשרית – 6.7% בשתי התמיסות, אך עדיין אחת מהן ניתנה בהסתברות של 0.8 והאחרת – תמיד).

נמצא שכאשר היכולת להבחין היתה קלה או בינונית, הדבורים העדיפו סיכון, ובחרו את האפשרות שהניבה תמיסה מתוקה יותר, אף על פי שתמיסה זו לא ניתנה להן תמיד (ואף שבניסוי של אבחנה בינונית, העדפת סיכון לא נתנה בממוצע תגמול טוב יותר). כאשר לא היה הבדל בריכוז הסוכר בין התמיסות, הדבורים העדיפו ודאות, כלומר בחרו בתמיסה שניתנה להן בוודאות.

מתוצאות אלו נראה שהדבורים משתמשות בכלל החלטה של העדפת האפשרות שנתפשת בזיכרון כזאת שהיתה טובה יותר רוב הפעמים. כאשר אי-אפשר להבחין בין רמת המתקנות של שתי האפשרויות, המקרים של חוסר תגמול מכריעים את הכף לטובת האפשרות הבטוחה. כך, כשהתמיסות זהות במתיקותן, הדבורים מעדיפות את התמיסה שניתנת להן בוודאות. לעומת זאת, כאשר קל להבחין בין שתי האפשרויות, הדבורים זוכרות שהאפשרות שכללה סיכון היתה ברוב המקרים מתוקה יותר מהאפשרות הבטוחה, אף על פי שטמנה בחובה מספר קטן של מקרים שבהם לא ניתן להן תגמול כלל, ולכן הן מעדיפות אותה.

בניסוי שנערך בבני-אדם, ניתנה לנבדקים (סטודנטים לתואר ראשון) האפשרות לבחור בין שני כפתורים של "מכונת כסף" וירטואלית. כפתור אחד הניב תמיד סכום קבוע (3). הכפתור האחר הניב סכום גדול יותר (4), אך רק בהסתברות של 0.8. הנבדקים לא ידעו מראש מה יהיו התגמולים. אלה הוצגו להם כמספר, מיד לאחר הלחיצה על הכפתור. כאשר הנבדקים התחילו לשחק וגילו זאת, הם הראו אפקט סיכון, כלומר, הם נטו ללחוץ יותר על הכפתור שהניב סכום גדול יותר, אף על פי שהתגמול ניתן רק ב-80% מהפעמים.

אחד הממצאים המעניינים ביותר היה שהנבדקים לא התנהגו כמו מדענים. הם היו יכולים לבדוק כל כפתור מספר קבוע של פעמים, ואז לגלות את הכלל. אך הם לא עשו זאת, אלא פשוט ניסו את הכפתורים ופיתחו העדפה לכפתור שנתפש בעיניהם כטוב יותר רוב הזמן. ההסבר של החוקרים לאפקט הסיכון שנמצא הוא פשוט: כאשר היכולת

בהגרת הלוטו הארצית מוצעים פרסי עתק למי שיצליח לנחש מבעוד מועד את המספרים העתידיים לעלות בגורל. בניגוד להנחה רווחת, אין מדובר במשחק מזל טהור. עיון בכללי המשחק ובדפוסי הניחוש של ציבור המהמרים מגלה, כי לא יהיה זה נכון לתאר את המשתתף כשחקן הנתון בזירה של הטלת גורל, בלא כל הזדמנות לשיקול דעת אסטרטגי. עוד מתברר כי לחלק מרוכשי הכרטיסים אין שום סיכוי לגרוף את המיליונים.

הגרת הלוטו ומזל טהור

הגרת הלוטו הנהוגה בעשורים האחרונים במדינות המערב מציעה לכל אחד ואחת את ההזדמנות הקורצת להתעשר בן רגע. טבעי אולי היה לחשוב, כי מדובר במשחק מזל טהור – כזה שתוצאותיו נקבעות מכוח הגורל בלבד, ולפיכך אין, ולא יכול להיות, שום שיקול אסטרטגי רציונלי שיש טעם להביא בחשבון בעת מילוי המספרים בטופס. ואמנם, ההגרה מתוארת לעתים קרובות, גם בספרות המקצועית, כמשחק על טהרת המזל, שבו יד המקרה לבדה מכריעה כיצד ייפול דבר, ושום אמצעי שינקוט המשתתף לא יוסיף ולא יגרע. כך, למשל, במאמר סקירה שנושאו הפסיכולוגיה הקוגניטיבית של ההימור בלוטו, קובע המחבר, פול רוג'רס, כי "במשחק הלוטו אין שום הזדמנות לעשות שימוש ביכולת".¹ עמדה זו, אף שהיא חוזרת ומושמעת, איננה מדויקת. וחשוב מכך – בטעות מושגית יסודה.

התפישה המתייחסת ללוטו כאל משחק מזל טהור מקבלת ביטוי בהזדמנויות שונות. מחקר שדה שבחן את התכונה הפסיכולוגית של שאיפת שליטה השווה בין שחקני לוטו הבוחרים בעצמם את המספרים בטופס ההימור, לשחקנים המשתמשים במחולל המספרים הממוחשב. הלוטו שימש כ"מצב שבו אין כל אפשרות לשליטה... מצב שבו התוצאות נקבעות ביד המקרה".² במחקר אחר, אשר דן במשתתפים המנבאים השתתפות במשחקי הלוטו, הוסבר כי ההבדל העיקרי בין הלוטו לבין סוגי הימור אחרים הוא ש"הגרות הלוטו הן במאת האחוזים אירועי מקריות, ואינן מקנות למהמר כל הזדמנות להשפיע על התוצאה או להשתמש במיומנות בדרך כלשהי".³ במאמר שעסק בהטיות תפישה

ובטעויות חשיבה העומדות בבסיס בחירת המספרים להימור בלוטו, הבהירו המחברים כי: "כל הרציונליזציות הקוגניטיביות לבחירת כרטיסי לוטו הן למעשה בלתי רציונליות. לאמתו של דבר לכל הכרטיסים סיכוי שווה לזכות".⁴ ואכן, לכל הניחושים סיכוי זהה, וההכרעה תיפול בהטלת גורל, אך האומנם נכון לקבוע שאין שום שיקול טקטי רציונלי שיוכל המשתתף להפעיל כדי להשפיע על הישגיו במשחק?

קו המחשבה מאחורי הקביעות המצוטטות גורס, כי היות שאין בנמצא כל אמצעי שיוכל לשפר את סיכויי הזכייה, הרי שממילא אין כל אמצעי שיוכל להביא תועלת למנחש. ואולם, לא זו בלבד שקיים אמצעי שיש עמו תועלת, אלא שגם לולא היה אמצעי כזה קיים, שגוי להסיק כי אין דבר מועיל שאפשר לעשותו רק על בסיס ההנחה, כי אין דבר מועיל שאפשר לעשותו על מנת להגדיל את ההסתברות לזכייה.

הסברה כאילו הגרלת הלוטו היא משחק מזל טהור מבוססת על האקראיות בקביעת המספרים הזוכים. בהנחה שמדובר בהגרה הוגנת ובתוצאות מקריות, הרי שלכל הרכב מספרים אפשרי ישנה אותה ההסתברות לעלות בגורל. למשתתף אין כל דרך להגדיל את סיכויי הזכייה בניחוש יחיד. יהיו אשר יהיו המספרים שעליהם יהמר – סיכויי הזכייה יעמדו בעינם. אלא שכדי לקבוע כי הגרלת הלוטו היא משחק מזל טהור, לא די בכך שאין אפשרות להשפיע על סיכויי הזכייה – יש להראות כי גם על גובה הזכייה הצפויה אין כל אפשרות להשפיע.

בשיטת הפרסים הנהוגה בהגרת הלוטו מחולק סכום הפרס שווה בשווה בין כל המנחשים הזכאים לו. כך לגבי הפרס הגדול, וכך לגבי הפרסים המשניים. הפרס הכספי הנופל בחלקו של כל זוכה קטן ככל שרבים שותפיו. ייטיב אפוא לעשות ממלא הטופס אם יבדיל את עצמו ככל האפשר בבחירת המספרים מרוכשי הכרטיסים האחרים, כך שבמקרה של זכייה, יצטמצם מספר השותפים שעמם ייאלץ לחלוק את השלל, ויגדל נתח הפרס שיוטל לכיסו. ככל שצירוף המספרים שתנחש נדיר יותר בקרב ציבור המהמרים, כך תרכוש, הלכה למעשה, כרטיס להגרה הנושאת פרסים גדולים יותר.

רשימת המקורות למאמר זה (על פי ההערות הממוספרות) מובאת באתר www.ifeel.co.il/galileo





דני הלמן

תצלום: אימולבנק / clipart ו- GettyImages

הניחוש הנכון בהגרלת הלוח

030

גיליאו
אוקט
2008

רוב האנשים מעדיפים לבחור בניחוש לוטו שנראה לטעמם אקראי⁵. לצורך זה, לא כל המספרים – ולא כל תאי הטבלה – שווים זה לזה בעיני המתבונן, כלומר לא כולם נתפשים כ"מקריים" באותה המידה. מבחינת אקראיות סובייקטיבית, תכונת הקצה, המאפיינת את משבצות השוליים, עלולה להיות להן לרועץ משום שפריטי קיצון נתפשים כפחות מייצגים. אנשים מצפים שתוצר של הליך אקראי יהווה דוגמה מייצגת למערך שממנו הוצא⁶, ומתוך כך אפשר שתאי הטבלה שבשוליים נתפשים – בטעות כמובן – כמועמדים פחות טבעיים או פחות מתבקשים לעלייה בגורל בהשוואה לתאים מרכזיים יותר. הטיה אינטואיטיבית כזו, המשפיעה ולו במעט על תודעת המנחש, עשויה, כאשר בוחנים את התמונה המצרפית המתקבלת מדפוס הבחירה של המוני משתתפים, להטות את הכף לכיוון המגמה המתגלה כאן של שכירות-יתר למספרים שבפנים הטבלה.

המספר שבע הוא הפופולרי ביותר בקרב ציבור הממהרים. היחס המועדף שלו הוא זוכה אינו חדש לספרות הפסיכולוגית. כאשר אנשים מתבקשים לבחור מספר, שיעור גבוה במיוחד בוחר במספר שבע⁷ – יותר מפי שניים מכל ספרה אחרת. הסברה היא כי שבע, מלבד היותו מספר מזל נודע, נתפש בתור האקראי והספונטני שבין החד-ספרתיים, משום שלא מתקיימות בו תכונות של חוקיות ניכרת כמו נקודת אמצע או קיצון או יחסי כפילה עם הספרות האחרות⁸.

בניגוד למספר המזל שבע, הפופולרי מכולם, המספר 34, חסר האופי, משתרך מאחור. מעמדו הציבורי הרעוע של המספר 34 הופך אותו כמובן לראשון המומלצים. ואולם, כדאי לשים לב כי מדובר בהמלצה שבעקבות השמעתה עשוי להתערער תוקפה: אפשר שפרסום הנתון יעלה את קרנו של המספר 34 בעיני מנחשים פוטנציאליים, מה שעלול לכרסם בחוסר-הפופולריות שלו. עוד יש להזכיר כי בהגרלת הלוטו הנהוגה בישראל כיום (מתכונת המשחק שונתה מאז נאספו הנתונים שתוארו למעלה), ששת המספרים שיש לנחש הם מהטווח שבין 1 ל-34, ולמתכונת הגרלה תיתכן השפעה על השיעור היחסי שבו נבחר מספר זה או אחר.

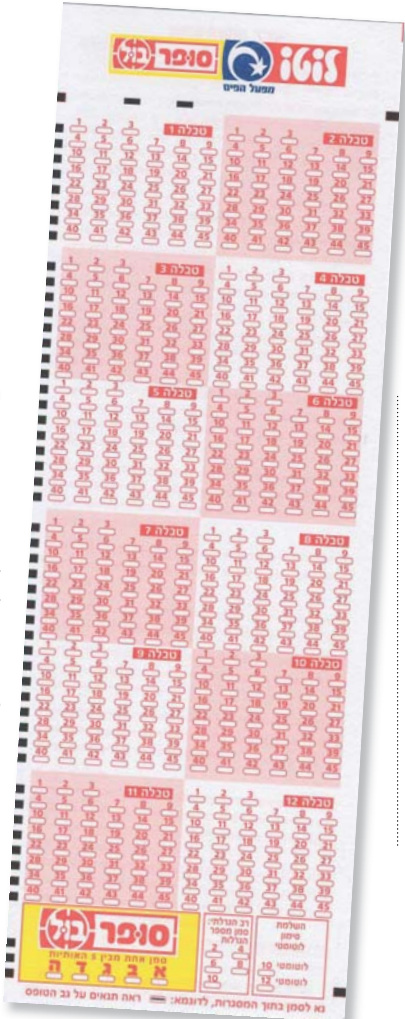
מעיון בנתונים עולה בבירור כי בחירת המספרים איננה אקראית. אפשר להבחין כי מספרים נמוכים נבחרים יותר ממספרים גבוהים. כך, למשל, המספרים החד-ספרתיים, 1 עד 9, ממוקמים כולם במחצית העליונה של טבלת השכירות, כלומר פופולריים יחסית, בעוד שהמספרים הגבוהים, בטווח שמעל 31, נדחקים לתחתית, כלומר פופולריים פחות. קל לשער כי אם בחירת המספרים לניחוש מושפעת משיקולים כגון תאריכים או מספרי מזל, ייהנו המספרים הנמוכים מעדיפות מסוימות. באופן כללי סביר יהיה להניח כי מספרים נמוכים נפוצים יותר בחיי היומיום, וצפויים להיקרות על דרכו של הפרט בתדירות גבוהה יותר, גורם שעשוי להשפיע אחר-כך על שיעור הופעתם בטופסי ההימור.

גם לאופן הסידור של מספרי הלוטו על פני טבלת המשחק עשויה להיות השפעה על הפופולריות של המספרים השונים. תרשים 2 מציג את ממצאי השכירות שפורטו זה עתה כפי שהם מצטיירים על גבי המבנה המרחבי של לוח המשחק. מבט בתרשים מגלה לא רק שמספרים נמוכים נבחרים יותר ממספרים גבוהים, אלא גם שמספרים בפנים טבלת המשחק נבחרים יותר ממספרים בשוליה. גם לדפוס זה אפשר להציע הסבר שקשור בהטיה פסיכולוגית מוכרת, ועניינה – תפישת אקראיות.

			טבלה מס'		
1	2	3	7	8	9
4	5	6	13	14	15
10	11	12	19	20	21
16	17	18	25	26	27
22	23	24	31	32	33
28	29	30	37	38	39
34	35	36	43	44	45
40	41	42			

תרשים 2 הפופולריות של מספרי הלוטו בקרב המנחשים
שכירות הניחוש של מספרי הלוטו על גבי המבנה המרחבי של טבלת המשחק. ככל שהמספר פופולרי יותר, המשבצת כהה יותר





תרשים 1 טופס הלוטו הרגיל ששימש למילוי הניחושים לקראת הגרלת מפעל הפיס ביום 10.12.2002. המשתתף מנחש שישה מספרים בין 1 ל-45, ומסמן את בחירתו על-ידי מילוי המשבצות המתאימות. הטופס מכיל 12 טבלאות משחק. יש למלא מספר זוגי של טבלאות (רכישה מינימלית: שתי טבלאות)

הניחוש הנכון בהגרלת הלוטו

נשאלת כמובן השאלה, כיצד לתרגם את האסטרטגיה העקרונית של היבדלות מרבית לטקטיקה מעשית של סימון המספרים בטופס. אם כלל ציבור המנחשים היה ממלא את המספרים באופן אקראי, הרי שלא היה כל הבדל בין השכיחות הצפויה של מספר אחד לבין השכיחות הצפויה של משנהו. ואולם, אם הניחושים אינם מקריים, לא מן הנמנע שיסתמנו מגמות שיטתיות המבטאות דפוסי העדפה. כדי לבחון את הסוגיה נשתמש בנתוני האמת של הניחושים שמואלו ונשלחו בפועל לאחת מהגרלות הלוטו של מפעל הפיס. תרשים 1 מציג את טופס הלוטו הרגיל ששימש להגרלה זו, וטבלה 1 מציגה את שכיחות ההופעה של מספרי הלוטו השונים בתוך מאגר כלל הניחושים.

טבלה 1 הפופולריות של מספרי הלוטו בקרב המנחשים

מספרי לטו	שכיחות (באלפים)
7	175
11 18 12	170-160
3 13 17 25 6 5 9 8 19	160-150
26 20 1 10 30 24	150-140
29 4 14 31 23 2	140-130
27 32 21	130-120
37 33 35 16 36 22 15	120-110
44 43 42 38 45 28	110-100
39 41 40	100-90
34	85

שכיחות ההופעה (באלפים) של מספרי הלוטו השונים בקרב כמיליון (989,402) ניחושים שנשלחו למפעל הפיס לקראת הגרלת הלוטו הארצית (10.12.2002). הבוא בחשבון רק טופסי לטו רגילים אשר סומנו במלואם באופן ידני במהלך שלושת הימים שקדמו להגרלה. (הנתונים אינם כוללים טפסים שיטתיים, טפסים לטוטומיים - כאלו שסומנו, בחלקם או במלואם, באופן אוטומטי על-ידי מחולל מספרים אקראיים ממוחשב, וטפסים רב-הגרלתיים שמולאו מבעוד מועד). בהנחה של סימון אקראי, כמות ההופעות הצפויה למספר לטו עולה מעט על 130 אלף (131,920.3).

אחרים הראו כי באמצעות משחק טקטי אפשר להכפיל את הערך הכלכלי של הטופס הנרכש¹¹, והיו אף שהרחיקו לכת לטעון כי במקרים מסוימים, הימור על מספרי לוטו בלתי פופולריים עשוי להיות בעל תוחלת רווח חיובית (!)¹², דהיינו השקעה כדאית במונחים כלכליים.

במישור המעשי, נחשוב רגע על רוכש כרטיס מן השורה המשתתף דרך שגרה בהגרלה, ומחזיר במרוצת הזמן פלח מההוצאה באמצעות גריפת פרסים משניים מעת לעת. אימוץ אסטרטגיה יעילה יוכל להוביל להפחתה ניכרת בעלות המצטברת הכרוכה במנהג ההשתתפות בהגרלה, בזכות התפיחה הצפויה בפלח ההחזר.

ואולם, נראה כי העצה הדרמטית ביותר שאפשר להעמיד לרשות ציבור המנחשים נוגעת לדרך שבה בשום פנים לא כדאי למלא את טופס המשחק. הסיכוי להתעשר בן לילה, קלוש ככל שיהיה, יכול להסביר את ממדי ההשתתפות ההמונית בהגרלה. אך ישנם ניחושים שאפילו את הסיכוי הקל הזה, הלכה למעשה, אינם מקנים. ישנם הרכבי מספרים שמי שמהמר עליהם, גם לו יזכה בפרס הגדול, לא יזכה בפרס גדול כלל ועיקר, משום שייאלץ לחלוק בסכום הזכייה עם עוד מאות או אף אלפי מנחשים.

איזהו הרכב מספרים אשר עשוי למשוך מנחשים רבים ולהתברר כנפוץ במיוחד בין כלל המשתתפים? רוב גדול מבין האנשים יעדיפו להמר על סדרת מספרים הנראית אקראית, כגון 11-14-20-29-37-43, ולא יבחרו בסדרה המצטיירת כבלתי אקראית בעליל, כגון 1-2-3-4-5-6¹³. זאת ככל הנראה מתוך תחושה כי הגרלה מקרית אינה אמורה להעלות תוצאה מסודרת או מיוחדת כל-כך. ואף על פי כן, בסופו של חשבון, במניין כלל הניחושים הנשלחים להגרלה, דווקא סדרה הנראית בלתי אקראית לחלוטין (כמו 1-2-3-4-5-6 או 5-10-15-20-25-30) תהיה נפוצה במיוחד, עם הופעות מרובות בתוך ים הטפסים, כאשר שכיחות ההימור עליה גבוהה לאין ערוך בהשוואה לסדרה מן השורה. כדי להבין תופעה זו יש להביא בחשבון שישנה כמות עצומה של סדרות הנראות אקראיות למדי, ורק כמות מזערית של סדרות

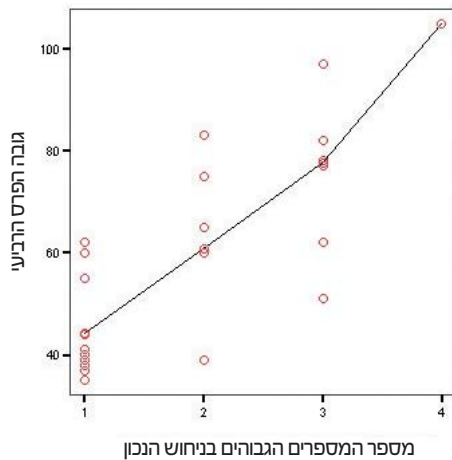
בעלות מראה סדור מושלם, שהוא ההפך המוחלט ממה שנתפס כאקראי. המוני המשתתפים המעדיפים להמר על סדרות הנראות אקראיות מתפזרים להם בין המוני הסדרות העומדות בדרישה זו, כך שבסופו של דבר על כל סדרה יש בדרך-כלל מנחש אחד או אפס מנחשים. המנחשים שבמיעוט הצר, הבוחרים דווקא בסדרות הנראות ההפך המוחלט מאקראיות, מתגודדים כולם סביב קומץ קטן של סדרות ייחודיות, כך שעל סדרה בודדת עשויים להתאסף מנחשים רבים.¹⁴

בחשבון הסופי, התכונה המאפיינת סדרות שזוכות לפופולריות יחסית בלתי רגילה בקרב מנחשי הלוטו היא בולטות פסיכולוגית. מדובר בסדרות בעלות ייחודיות ניכרת, הנבנות על פי כלל פשוט, אשר רבים עשויים לאמץ¹⁵. דוגמה מובהקת היא, כאמור, ששת המספרים הראשונים: 1-2-3-4-5-6. מעל אלף ניחושים של סדרה זו נשלחו למפעל הפיס לקראת ההגרלה שסקרנו. בין הניחושים הפופולריים ביותר אפשר למצוא גם שרשרות אחרות של מספרים עוקבים, וכן סדרות חשבוניות בכלל – רצפי מספרים שבהם הפרש זהה מופיע בין כל מספר לבא אחריו.

ניחוש הלוטו הפופולרי ביותר בארץ, כפי שעולה מסריקת כלל הטפסים שנשלחו להגרלה, היה הסדרה החשבונית הזאת: 9-14-19-24-29-34. סוד הקסם של ניחוש זה מתגלה מיד כאשר מסמנים את המספרים בטבלת המשחק. הייחודיות איננה רק אריתמטית, אלא בעיקר גאומטרית. ההרכב משרטט קו אלכסוני מדויק היורד מן הפינה הימנית העליונה של לוח המספרים. תרשים 4 מציג את 12 הניחושים הנפוצים ביותר בהגרלת הלוטו, כפי שנראה סימונם על גבי טופס המשחק. כל אחד מן הניחושים הללו מופיע במאגר כלל הטפסים אלפי פעמים מעל המצופה בהנחה של מילוי אקראי. עם הניחושים הנפוצים נמנות סדרות המייצרות דגם מרחבי סדור על פני טבלת המשחק, כמו אלכסון, שורה או טור. גם הרכב המספרים הזוכים בהגרלה הקודמת, שנערכה שלושה ימים קודם לכן – 11-16-19-24-31-44, מופיע בין תריסר הניחושים הפופולריים ביותר.



תרשים 3 הקשר בין כמות המספרים הגבוהים בניחוש הנכון לגובה הפרס



נתוני הגרף מתייחסים לתוצאות הגרלת יום ד' של הלוטו הבריטי במשך תקופה של חצי שנה (1.8.2007-23.1.2008). בלוטו הבריטי יש לנחש שישה מספרים בין 1 ל-49. בציר האופקי: כמה מבין ששת המספרים שעלו בגורל גבוהים מ-31. בציר האנכי: גובה הפרס, בליחות שטרלינג, אשר לו זכאי כל משתתף שהניחוש ששלח מכיל ארבעה מבין ששת המספרים הזוכים (פרס רביעי). המתאם בין כמות המספרים הגבוהים שעלו בגורל לבין גובה הפרס שהוענק לכל זוכה ($r=0.77$) נובע מהתמטות הזכאים ככל שמתרבים המספרים הגבוהים בניחוש הנכון. (הקו שעל פני התרשים עובר בין ערכי הממוצע: פרס רביעי ממוצע בהינתן כמות המספרים הגבוהים בניחוש הנכון)

על בסיס נתונים מעין אלו נעשו ניסיונות אחדים לאמוד בתחשיבים מתמטיים את התועלת שיוכל המשתתף להפיק מהפעלת הטקטיקה של סימון הטופס באופן בלתי פופולרי. שני סטטיסטיקאים אירופים המליצו למנחשים להמור על סדרות שבהן סכום המספרים גבוה למדי, ולהימנע מריבוי של הפרשים זהים בין מספר למספר¹⁰. ניתוח תוצאות מדומות שערכו העלה כי הימור על סדרות שהופקו בהליך אקראי, ואחר-כך סוננו על פי עקרונות אלו, הגדיל את שיעור הרווח הצפוי מפרסים משניים בעשרות אחוזים. מחקרים

ואולם, באשר למגמות העיקריות, נראה כי אפשר להצביע על עקביות ניכרת בדפוסי הניחוש של ציבור המהמרים מעבר למועד או למקום מסוים: מדיווחים מקבילים מן העולם? עולה תמונה דומה, שלפיה מספרים נמוכים מופיעים בטופסי הניחוש בשיעורים גבוהים יחסית, ומספרים גבוהים – בשיעורים נמוכים יותר. גם העדיפות של תאים בפנים הטבלה, ואפילו מיעמד הבכורה של המספר 7, אינם ייחודיים לקהל מסוים. כראיה לתוקף היציב של דפוסי הניחוש המסתמנים, נוכל להשתמש בניתוח של דיווחי זכויות עדכניים מהגרלת הלוטו הבריטית. אם נחזור לשאלת האסטרטגיה הרציונלית, הרי שנוכח הנתון כי מספרים נמוכים הם פופולריים יותר בקרב ממלאי הטפסים, הטקטיקה היעילה הנגזרת מכך היא להמור על מספרים גבוהים, בהנחה שעלייתם בגורל תגרור מיעוט יחסי של זוכים, וכפועל יוצא – עלייה בגובה הפרסים. תרשים 3, המציג באופן גרפי נתונים על הגרלת הלוטו הבריטית מן השנה האחרונה, אכן מעיד על קשר בכיוון הזה: ככל שרבים המספרים הגבוהים (מעל 31) בניחוש הנכון שעלה בגורל, כך גובה הפרס הצפוי למי שניחש נכונה חלק מהמספרים הזוכים.





בינואר, שנת 2008. אנו יודעים זאת בוודאות משום שאלו הם בדיוק המספרים שעלו בסופו של דבר בגורל, ומספר הזוכים בפרס הגדול בשווי £11,553,412 (מעל 80 מיליון שקלים) התברר כאפס. מתוך 117 הגרלות הלוטו שערך מפעל הפיס בארץ במהלך שנת 2007, ב-101 הגרלות לא נמצא שום משתתף שהימר על הניחוש הנכון ואשר יהיה זכאי לפרס הראשון. הרוב העצום של הרכבים זוכים שלא נמצא להם מנחש מעיד על השיעור הגבוה של צירופים אפשריים שאיש אינו מנחש לקראת ההגרלה. לממלא הטופס במסוף הלוטו אין כמובן כל דרך להבטיח בלעדיות על הניחוש שיסמן, מה גם שחלק ניכר מן הטבלאות הנשלחות להגרלה ממולא באופן אוטומטי – על-ידי מחולל מספרים ממוחשב, אך הניסיון לכוון לצירוף בלבד, כמו ההקפדה להימנע מצירוף פופולרי, הוא בלא ספק שיקול טקטי רציונלי תקף הפתוח בפני המשתתף.

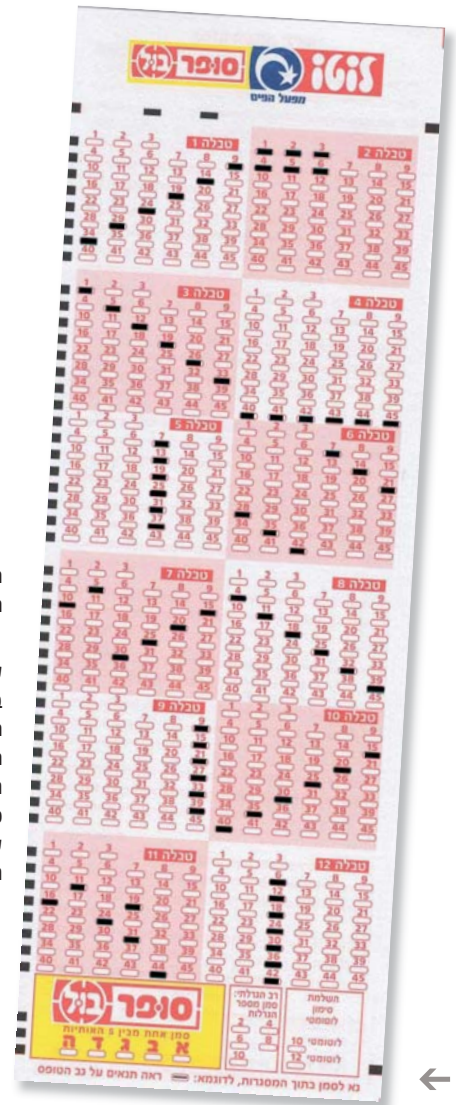
מקורות הטעות

לאור תמונה זו, כיצד אפשר להסביר את הקביעה הנחרצת, העולה גם במאמרים מלומדים, כאילו הגרלת הלוטו היא משחק מזל טהור לגמרי, שאינו מותיר כל הזדמנות לשיקול טקטי רציונלי תקף?

הגורם הבולט הראשון שעשוי להסביר את הרושם המוטעה כאילו הגרלת הלוטו היא משחק מזל טהור הוא ההגרלה עצמה. מהות הליך ההגרלה בהעלאת תוצאה מקרית, בלתי נשלטת. משחק הלוטו מוכרע בהטלת גורל באמצעות מנגנון מכני שנועד להפיק תוצאות אקראיות. בעיני מי שמתרשם מהנוהל הפרוצדורלי של המשחק במקום לעמוד על מבנהו הפורמלי, עשויה להצטייר תמונה של שחקן פסיבי היושב בביתו וממתין לתוצאה שאין בידו להתערב בה. הלא גם למשתתף הלהוט ביותר אין דרך של ממש להשפיע על זהות הכדורים הממוספרים, שיבקעו ממכל הערבוב השקוף. אלא שתוצאות ההגרלה האקראית איננה, בסופו של דבר, תוצאת המשחק מבחינת המשתתף. רווחים כספיים, ולא מספרים נכונים, הם המטרה האמיתית של המשחק. השאלה איננה אם יש בידי המשתתף כדי להשפיע על הרכב המספרים שיועלה בגורל, אלא אם יש בידיו כדי להשפיע על מאזן התשלום הצפוי לו מן ההשתתפות.

תרשים 4 ניחושי הלוטו הפופולריים ביותר

טופס הלוטו הרגיל בהגרלת מפעל הפיס מיום 10.12.2002, שעליו מסומנים תריסר הניחושים הנפוצים ביותר (בין כלל הטפסים הרגילים שנשלחו במהלך שלושת הימים שקדמו להגרלה)



באופן כללי, העיקרון המנחה למניעת מפח נפש במקרה של זכייה: בשום פנים אין להמר על הרכב מספרים בעל בולטות גבוהה. סדרה בולטת במיוחד, שעקרון הרכבתה זמין לכל, תעלה גם על דעתם של אחרים, ותסומן בסופו של דבר על טפסים רבים יחסית. מי שמהמר למשל על סדרת המספרים 1-2-3-4-5-6, שם את כספו על הסיכוי הזעום של אחד למיליונים להרוויח לא מיליונים, אלא אלפים בלבד. מאידך גיסא, אפשר לתת את הדעת על הרכב המספרים הזה למשל: 4-12-13-15-30-36. את הסדרה הזאת לא בחר איש לקראת הגרלת הלוטו הבריטי שנערכה ב-8



הטענה כי הגרלת הלוטו היא משחק מזל טהור, ניכר כי זוהי בעצם טענת-נגד, הבאה בתגובה למערכת שלמה של טעויות והטיות באופן שבו אנשים מתייחסים להליכים אקראיים בכלל ולהגרלה הארצית בפרט. תיאור משחק הלוטו כעניין של מקריות מוחלטת נשמע למעשה מושכל למדי כאשר הוא מוצג על רקע אמונות תפלות ושיטות חסרות שחר הרווחות בקרב ציבור המהמרים בימים כתיקונם, וביתר שאת לקראת הגרלות ענק.

בעיית הגרעין באופן שבו אנשים מתייחסים להגרלה היא ציפיות מוטעות מן ההליך האקראי. המחקר מלמד כי תפישת האקראיות של בני-אדם נגועה בהטיות שיטתיות¹⁶, כאשר הממצא העיקרי הוא שאנשים מצפים למצוא לאורכה של סדרה אקראית יותר השתנויות ופחות מקבצים מאשר צפוי בה באמת. אם נחיל תופעה זו בהקשר ההגרלה, אנשים יעריכו כנמוך מכפי שהוא את הסיכוי שבין ששת המספרים שיועלו בגורל (בין 1 ל-45) יהיו שני מספרים עוקבים, סיכוי שערכו עולה למעשה על חמישים אחוז.

האפיון הבולט ביותר שאנשים מצפים למצוא בתוצר של הליך אקראי הוא חוסר סדר והיעדר תבנית. דניאל כהנמן ועמוס טברסקי¹⁷ מסבירים כי בני-אדם מצפים שגם מדגם קטן יהיה מייצג, וישקף את התכונות הבסיסיות של אוכלוסיית-האם שממנה ניטל ואת מקריות הליך הדגימה. על רקע זה אפשר להבין את הממצא שאנשים יעדיפו להמר על ניחוש הלוטו 11-14-20-29-37-43 מאשר על הניחוש 6-5-4-3-2-1, כאשר הראשון מעניק ייצוג הולם יותר לתפוזות המספרים ואיננו ערוך בתבנית סדורה, ולפיכך ייתפס כאקראי יותר.

אלן לאנגר (Langer) מהמחלקה לפסיכולוגיה באוניברסיטת הרווארד טבעה את המונח "אשלית שליטה"¹⁸ לציון תחושה מוטעית של אפשרות להשפיע. מתברר כי אנשים נוהגים לעתים כאילו היה בידם כוח השפעה כלשהו גם כשהמצב איננו כזה. כך, למשל, במשחק הגרלה של פרס כספי שנערך בין עובדי משרד, משתתפים אשר בחרו בעצמם את כרטיס ההגרלה שלהם היו הרבה פחות נכונים אחר-כך למכור אותו (טרם עריכת ההגרלה) בהשוואה למשתתפים שהכרטיס נבחר עבורם¹⁹. הבחירה האישית העלתה את שווי הכרטיס עבור המחזיק בו. אפשר

במישור הלוגי, הכשל ממוקד בגזירה הבלתי מבוססת הזאת: למשתתף אין כל דרך להיטיב את ההסתברות לזכייה, מכאן שלמשתתף אין כל דרך להיטיב את עמדתו. על פי היגיון לקוי זה, מצבו של השחקן מגולם כולו בתמונת הסיכויים. אם אין דבר שאפשר לעשותו בנוגע לסיכוי, הרי שאין דבר שאפשר לעשות כלל. אלא שמהלך הסקה זה מביא בחשבון אך ורק את ההסתברות לזכות, ואינו מעניק משקל כלשהו לערכי הפרסים העומדים לזכייה. זאת בשעה שהגרלת הלוטו עצמה, נוכח היקפי ההשתתפות, היא אולי העדות הטובה ביותר לכך שבעיני רבים דווקא שיקול גובה הפרס עשוי להאפיל לחלוטין על שיקולי ההסתברות לזכות בו. על פי הגישה הרציונלית לקבלת החלטות יש כמובן לתת משקל לשני הגורמים גם יחד. המושג המתמטי המשמש בנייתו מצבי אי-ודאות כמו הגרלה או נטילת סיכון הוא התוחלת, המביאה בחשבון הן את הסתברות התוצאה והן את ערכה, ובמקרה שלפנינו – הן את הסיכוי לזכות והן את גובה הזכייה.

התוחלת מחושבת על-ידי מכפלת כל תוצאה אפשרית (כמו הרווח הכספי) בהסתברות לה, וסיכום המכפלות. התוחלת היא מדד דו-ממדי, המשקלל באיזון בין הערכים שאפשר להפיק לבין הסיכויים להעלות תפוקות אלו. קל להיווכח כיצד שימוש בהסתברות במקום בתוחלת כאמת מידה לבחינת מצבי הגרלה מוביל לאבסורד. נניח כי מוצע לנו לבחור בין שתי הגרלות שמחירן זהה, ושהסתברות הזכייה בכל אחת מהן היא אותה ההסתברות, אך בהגרלה הראשונה הפרס גבוה פי מאה מאשר באחרת. האם יעלה על הדעת לטעון כי היות שסיכויי הזכייה זהים, הרי ההגרלות שוות-ערך, ואין כל טעם להפעיל שיקול דעת בבחירה ביניהן? הטענה כאילו הגרלת הלוטו היא משחק מזל טהור שאין בו שום הזדמנות להביא לביטוי בקיאות או יכולת נסמכת על התייחסות שגויה, הרואה את המגרש באופן חד-ממדי – דרך מדד הסיכויים, תוך הזנחה של שאלת הסכומים המוטלים על הכף.

אלא שקשה להניח כי המומחים אשר הציגו את הגרלת הלוטו כמשחק מזל טהור אינם אמונים על מושג התוחלת. כיצד בכל זאת אפשר להסביר את הקביעה השגויה העולה מדבריהם? כאשר בוחנים את ההקשר התוכני שבו מושמעת



לגופה של הטעות, ניכרות ממנה ההבחנה בין התייחסות להליך המשמש בפועל – מהלך העניינים הטכני – לבין עמידה על המבנה הפורמלי, הממפה באורח סדור את מרכיבי המערכת, וכן ההבחנה הבסיסית בין מושגי ההסתברות והתוחלת ואופן היישום ההולם את השימוש בהם. למהותה של הטעות, משתקפת בה הבעיה של התייחסות אינדוקטיבית בלתי זהירה, המוציאה כלל גורף ובלתי תקף מתוך התמקדות במקרים שלגביהם הוראת הכלל אכן מתקיימת. ■

רשימת המקורות למאמר זה (על פיה הערות הממוספרות)
מובאת באתר www.ifeel.co.il/galileo

דני הלמן הוא דוקטורנט במחלקה לפסיכולוגיה באוניברסיטת תל-אביב.

לקריאה נוספת:

בר-הלל מיה. (2005). רציונליות, הוגנות, אושר. מבחר מאמרים מאת דניאל כהנמן ועמיתים. הוצאת הספרים של אוניברסיטת חיפה וכתר הוצאה לאור.

Henze, N. and Riedwyl, H. (1998). *How to Win More: Strategies for Increasing a Lottery Win*. Natick, MA: A K Peters.

Rogers, P. (1998). The cognitive psychology of lottery gambling: a theoretical review. *Journal of Gambling Studies*, 14(2), 111–134.



להסביר כי אנשים מזהים הזדמנויות שאין בהן ממש, מבלי להזדקק לטענה הגורפת כי אין בנמצא הזדמנויות כלל. הכותבים, הבאים מעמדת מומחיות, שקועים בניתוח של עמדות שגויות השכיחות בקרב הקהל הרחב, ותוך כדי הדיון יוצאים בעצמם בהצהרה שגויה מן הכיוון המנוגד. תוך כדי הפרכה של אמונות בלתי רציונליות המייחסות שיטתיות להליכים אקראיים, מועלית קביעה הלשונית בעצמה מבחינת רציונליות, המייחסת אקראיות טוטלית לזירה הפתוחה למעשה למרכיב של שיטה.

ללמוד מהטעות

תיאור הגרלת הלוטו כמשחק מזל טהור הוא טעות מעניינת במיוחד מכמה היבטים, כזו המזמנת מבט אל כמה ליקויים פוטנציאליים, שכדאי לתת עליהם את הדעת, בבחינת ללמוד מטעויות. בראש ובראשונה, מדובר בטעות שעושים מומחים, ולא זו בלבד, אלא טעות שעושים מומחים בשעה שהם דנים בטעויות שעושים הדיוטות. הטעויות שבהן דנים המומחים מבטאות הטיה אינטואיטיבית בהלכי מחשבה של עוברי אורח תמימים, אך הטעות שאותה הם מבצעים בעצמם נופלת בדבריהם של בעלי הסמכות האמונים על התחום ומחויבים בהתמצאות, ומתרחשת במהלך כתיבה מחושבת ושקולת דעת. מותר היה לצפות ממי שמקדיש את עבודתו לחקר טעויות של הציבור הרחב שינהג על פי מידת הזהירות, ולא יספק בעצמו חומר לחקר טעויות.

עוד יש לשים לב כי מדובר בטעות החוזרת ומופיעה במאמרים מקצועיים המובאים לפרסום, וזאת בשעה שבמקביל מתפרסמים מחקרים המוקדשים לניתוח אסטרטגיית ההימור היעילה בלוטו, ואשר מעידים כמובן, בעצם קיומם, על טיבה השגוי של הקביעה כאילו אסטרטגיה יעילה כזו איננה בנמצא. כלומר, לפנינו טעות המצליחה לא רק לעבור בדרכה לדפוס על פני מערכות בקרה קפדניות, אלא גם לשוב ולהופיע בהמשך בהיעדר תיקון הולם, ואף לשרוד לצד ראיות בולטות לסתירתה, המובאות במאמרים אחרים, ואפילו, כפי שנוכחנו, במסגרת אותו המאמר עצמו.



שההזדמנות לבצע בחירה, גם כשאיננה רלוונטית להצלחה, תעורר תחושה מסוימת של מעורבות משמעותית או מידת שליטה. שיטות שונות ומשונות שנוקטים משתתפי הגרלת הלוטו על מנת לחזות אילו מספרים עומדים לעלות בגורל יכולות לשקף תחושה מוטעית כאילו הליך ההחלטה יכול אמנם לקרב את המנחש אל המספרים הנכונים.

מבין השיטות המופרכות לבחירת מספרים, כדאי אולי להזכיר את אלו המערבות פעילות סטטיסטית מאומצת של ניתוח תוצאות מהגרלות קודמות. על פי שיטת המספרים החמים²⁰, מומלץ להמר על אותם מספרים אשר "הוכיחו את עצמם" בעבר והרבו לעלות בגורל. הגישה ההפוכה, המשקפת את מה שנודע ככשל המהמרים²¹, מובילה דווקא להימור על אותם מספרים שמיעטו לעלות בגורל עד כה, או על אלו שלא עלו מזה זמן – מתוך אמונה ששעתם קרבה.

על פי הגישה הרואה בהגרלת הלוטו משחק מזל טהור, שיטות אלו הן חסרות כל תועלת. בהנחה שמנגנון ההגרלה תקין והתוצאות אקראיות, הרי כל ניסיון לנבא את מספרי המזל בהסתמך על תוצאות העבר הוא עקר מיסודו. מהותו של ההליך האקראי בכך שאין כל דרך לשפר את החיזוי בנוגע לתוצאות עתידיות. אלא שלאמתו של דבר, כפי שמתברר כאן, שיטות אלו לא זו בלבד שאין בהן תועלת, אלא שיש עמן נזק. הן מדגימות הליך לבחירת מספרים על פי כלל ברור ונגיש, הפתוח לשימוש בפני כל. הניחוש שיתקבל מהליך כזה יהיה נפוץ במיוחד בקרב ממלאי הטפסים, ולכן השיטה שמאחוריו לא רק שאיננה מועילה, אלא אף מוליכה להימור פחות כדאי.

כאשר בוחנים מהו ההקשר שבו עולה הטענה כאילו הגרלת הלוטו היא משחק מזל טהור, מתברר כי היא מושמעת תוך כדי דיון באותן הטיית המשקפות כשלים בתפישת אקראיות²² או תחושה מדומה של שליטה²³. על פי התמונה המצטיירת, הכותבים מפנים את מבטם לטעות מסוג אחד, ואגב כך נעלם מעיניהם הקושי המתעורר בדבריהם-שלהם. הצגת ההגרלה הארצית כעניין של מזל בלבד מופיעה אגב הדיון בתפישות שגויות שבהן אוחזים המשתתפים. הטענה כאילו אין שום הזדמנות לשיקולים טקטיים עולה תוך כדי דיון בשיקולים

טקטיים אשר אין בהם ממש. מתוך שההתבוננות מרוכזת באמצעי סרק שונים שנוקטים המנחשים, משתרבת לדיון ההנחה כאילו זירת ההגרלה איננה מזמנת אלא אמצעי סרק, ולא ניתנת כראוי הדעת על מבנה המשחק, ועל האפשרות כי בצד אמצעי הסרק שמביאים עמם באי ההגרלה, יש עדיין מקום לאמצעי אפקטיבי.

המנחשים חשים, לדוגמה, כאילו אין זה מן התבונה להמר על סדרת המספרים 1-2-3-4-5-6 – משום שאיננה נראית אקראית כפי שמצופה מתוצאה של הגרלה. המומחים באים לדון בהטיות תפישתיות מסוג זה, ומתוך הכרה כי אין שום בסיס אמיתי לשער מה תהייה תוצאות ההגרלה, קובעים כי כל שיטת משחק שתוצע תהיה בעצם משוללת יסוד. מתוך התמקדות בעקרונות בחירה בלתי רציונליים המנחים את קהל המהמרים, מנסחים המומחים כלל גורף מדי, כאילו כל עקרון בחירה שיאומץ יהיה בלתי רציונלי.

מאמר שהתפרסם בכתב-עת בריטי לפסיכולוגיה, והוקדש רובו ככולו לטעויות החשיבה האופייניות למשתתפי ההגרלה, הופיע תחת הכותרת "בחר שישה מספרים, מספרים כלשהם"²⁴. מהכותרת משתמע כי בניגוד למה שנדמה לרבים, אין זה משנה כלל באילו מספרים תבחר. זאת בשעה שבגוף אותו המאמר עצמו מסופר כי באחת מהגרלות הלוטו הבריטי הימרו כמעט 30,000 מנחשים על הסדרה 1-2-3-4-5-6, וכי לוי היו מספרים אלו עולים בסופו של דבר בגורל, היה כל אחד מהזוכים בפרס הגדול נאלץ להסתפק בסכום הצנוע של 1,400 לירות שטרלינג²⁵. הנה כי כן, מגיעים הדברים לכדי כך שבאותו המאמר עצמו מובאת מצד אחד ראייה דרמטית לכך שלא כל ניחוש טוב באותה המידה, ובד בבד נבחרת למאמר כותרת שממנה משתמע כאילו כל ניחוש טוב באותה המידה.

הקביעה המוטעית כאילו ההגרלה הארצית היא משחק מזל טהור מופיעה כניגוד לרשמים ולאמצעים, מוטעים לכשעצמם, המשמשים לניבוי המספרים הצפויים לעלות בגורל. הטענה באה לשלול אמונות שווא, ועולה ברוח אינדוקטיבית מתוך התייחסות לתפישות מוטעות, אך מנוסחת שלא לצורך באופן קטגורי. הלא אפשר היה

כבני אנוש, אנו מוגבלים לתפישה תחושתית תלת-ממדית. אף על פי כן, הצלחנו לנסח מודלים מתמטיים אשר כוללים ממדי מרחב נוספים, ובכך מפשטים לאין שיעור את התיאור הפיזיקלי הבסיסי של העולם. בשנת 2009 נקבל הזדמנות ראשונה לבחון את קיומם של ממדים אלו במעבדה.

המוטיבציה להכנסת ממדים נוספים לתיאוריות פיזיקליות

בבואנו לנתח תהליך פיזיקלי, ישנה חשיבות עליונה למציאת גדלים נשמרים (constants of motion) ולניסוח חוקי שימור מתאימים. העובדה שגדלים אלו נשמרים מאפשרת לנתח את התהליך הפיזיקלי שהתחלנו ממנו. דוגמה פשוטה לגודל נשמר היא מספר הגרגרים בשעון חול. ברור לכולנו כי אילו מספר זה היה משתנה, לא היינו מסוגלים למדוד זמן במדויק בעזרת שעון כזה.

כבר בתחילת המאה ה-20 היה ידוע, כי חוקי השימור בטבע קשורים קשר הדוק עם סימטריות של המרחב (לעת עתה נציין רק כי סימטריות של המרחב הן תכונות גאומטריות בסיסיות של המרחב, וראו: מיכל סחף, "גדלים נשמרים וסימטריה", "גליליאו" 71). ב-1918 הוכיחה המתמטיקאית אָמי נתר (Noether) משפט המבטא קשרים אלה בשפה מתמטית. לפי משפט נתר, שימור התנע, למשל, נובע מסימטריה של המרחב להזזות ולסיבובים (תנע הוא אחד ממאפייני התנועה של גוף כלשהו). שימור האנרגיה נובע מסימטריה להזזה בזמן (וראו "משפט נתר", במסגרת). מדוגמאות אלו נובע, כי חוקי השימור אינם אלא תכונות גאומטריות של המרחב והזמן. אם נגלה בטבע סימטריות חדשות, יתבקש לפרש אותן כגאומטריה חדשה של המרחב, גם אם גאומטריה זו גורסת כי בניגוד לתפישה החושית שלנו, מספר הממדים הקיימים גדול משלושה. העיקרון הקושר את הסימטריות המרחביות לחוקי השימור הוא כה אלגנטי, עד כי כבר למעלה מארבעה עשורים פיזיקאים רבים מוכנים להניח כי ממדים נוספים אכן קיימים, והטענה היא כי חוקי הטבע נעשים פשוטים יותר כשמבטאים אותם במסגרת מרחב מרובה-ממדים.

אף על פי שאין ביכולתנו לדמיין איך נראה מרחב בעל יותר משלושה ממדים, מבחינה מתמטית הדבר פשוט למדי. כפי שאנו מתארים נקודה במרחב תלת-ממדי בעזרת שלוש קואורדינטות (x,y,z) המייצגות את מיקומה המדויק, כך

משפט נתר

משפט נתר, שניסחה המתמטיקאית אמי נתר (Noether), הוא משפט יסודי בפיזיקה תיאורטית, הקושר בין סימטריה של מערכת כלשהי לבין חוקי השימור שהיא מקיימת. המשפט קובע כי עבור כל סימטריה רציפה, ישנו גודל שמור. (סימטריה רציפה היא מצב שבו אפשר לבצע באובייקט שינוי קטן מבלי לשנות את מצבו ההתחלתי. למשל סיבוב של מעגל, שלא משנה כמה נסובבו, המצב שלו לא ישתנה. לעומת זאת, אם מסתכלים על משולש שווה-צלעות, רואים כי רק סיבוב בזווית של 120 מעלות ישאיר אותו באותו מצב. זוהי סימטריה בדידה.) לדוגמה: משמעותה של סימטריית הזזה היא כי חוקי הפיזיקה אינם משתנים עם הזזת המערכת במרחב, והגודל הנשמר במקרה זה הוא התנע. משמעותה של סימטריה לסיבובים היא כי חוקי הפיזיקה ישארו זהים בעקבות סיבוב הקואורדינטות, והגודל הנשמר הוא התנע הזוויתי.

כדוגמה נתבונן במשטח קרח אופקי שעליו שני אנשים. כיוון שהמשטח אופקי, המחליקים יכולים לנוע לכל כיוון בהשקעת כוח זהה (אין כיוון מועדף). אם נדחף אחד מהם, הוא ימשיך לנוע מבלי שיצטרך להפעיל כוח כלשהו. כיוון שהקרח אינו מפריע (כמעט) לתנועתו, מהירותו תישאר קבועה, ולכן גם התנע יישמר. באותו אופן, כאשר שני האנשים יחזיקו זה בזה ויסתובבו ביחד במרחק קבוע ביניהם, מהירות הסיבוב לא תשתנה, ולכן יישמר התנע הזוויתי. כדי לשבור את הסימטריה, נטה את המשטח בזווית כלשהי. עתה יצרנו כיוון מועדף – קל יותר להחליק במדרון, ולכן המהירויות, כמו גם התנעים, לא יישמרו.

שימור אנרגיה שונה בכך שהוא נובע מסימטריה של הזמן ולא של המרחב. משפט נתר מראה כי כאשר חוקי הפיזיקה אינם משתנים בין זמנים שונים (סימטריה בהזזה בזמן), הגודל שנשמר הוא האנרגיה.

גם שימור המטען החשמלי ושימור גדלים פיזיקליים אחרים מתקבלים מסימטריות רציפות אחרות. ■





יבגני יורקובסקי ונועם הוד

תצלום: אימלבינק / GettyImages

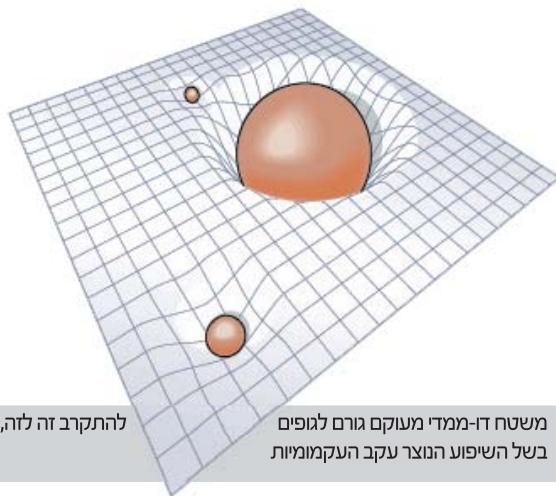
ממדים נוספים - חלום או מציאות?

מאיץ החלקיקים LHC יופעל בקרוב בחיפוש אחר הממדים הגבוהים



042

גיליאו
אוקטובר
2008



להתקרב זה לזה
משטח דו-ממדי מעוקם גורם לגופים בשל השיפוע הנוצר עקב העקמומיות

רעיונו של איינשטיין אולי לא היה מקורי לגמרי, אך הדרך שבה ניסח אותו היתה יפה להפליא. לאחר כשלוש שנים של חיפוש אחר מתמטיקה חזקה די הצורך להצגת גאומטריה עקומה, הוא נתקל, בסיוע חברו, המתמטיקאי מרסל גרוסמן (Grossmann), בגאומטריה של רימן. גאומטריה זו משתמשת באובייקט מתמטי בשם "טנזור העקמומיות של רימן"¹. איינשטיין השתמש באובייקט זה, אך שם לב לכך שהטנזור של רימן נושא איתו מידע עודף, ובנה אובייקט חדש הנקרא על שמו – "טנזור איינשטיין" $G_{\mu\nu}$, המייצג בכל נקודה את העקמומיות של המרחב-זמן. כדי לקשור את עקמומיות המרחב-זמן עם המסות והאנרגיות הפזורות בו, השתמש איינשטיין באובייקט מתמטי נוסף הנקרא "טנזור אנרגיה-תנע" $T_{\mu\nu}$, המייצג את המסות והאנרגיות בכל נקודה. משני אובייקטים אלו בנה איינשטיין את המשוואה המפורסמת השנייה שלו – משוואת איינשטיין, המתארת את הקשר המדויק שבין מסה ואנרגיה לבין עקמומיות המרחב-זמן: $G_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu}$, כאשר G הוא קבוע הגרביטציה של ניוטון (וראו: יוסף ורבין, "קיצור ותולדות כוח הכובד", "גליליאו" 43).



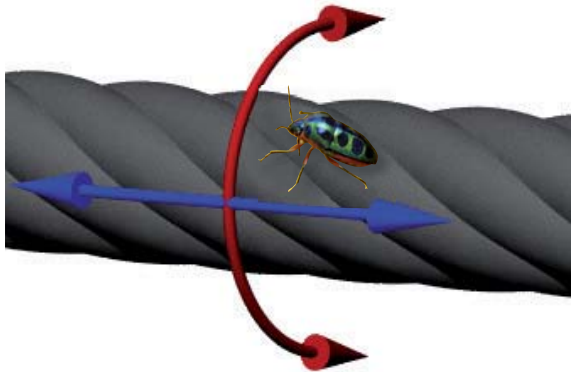
שאור עובר בשמונה דקות). נניח שלפתע פתאום השמש מתפוצצת ונעלמת בתוך זמן קצר ביותר. לנו השמש תיראה שלמה במשך 8 הדקות שלאחר הפיצוץ, מכיוון שהמידע על האירוע ינוע במהירות האור, ובמהלך 8 הדקות הללו אנו נראה למעשה את האור שיצא מהשמש לפני הפיצוץ. אך לפי משוואת ניוטון, ההשפעה הכבידתית אמורה להיעלם יחד עם השמש, באותו רגע עצמו! במכניקה ניוטונית הכוח מתואר כפעולת גומלין סימולטנית בין שני גופים מרוחקים, כלומר – אין השהיה במעבר המידע (הכוח) בין הגופים, וההשפעה היא מיידית. סתירה זו הטרידה את איינשטיין, ועל מנת ליישב אותה ניסח, ב-1915, את תורת היחסות הכללית.

איינשטיין קבע, כי כוח הכבידה הוא תכונה גאומטרית של המרחב-זמן. המסות הפזורות ביקום מעקמות את המרחב-זמן, ועקמומיות זו נראית לנו ככוח משיכה בין הגופים. לפי איינשטיין, כל הגופים נעים בקווים ישרים במרחב עקום (בדומה לתנועה שלנו בקו ישר על גבי כדור-הארץ הכדורי), ומכיוון שתנועתם נראית לנו עקומה, אנו נאלצים לחשוב על כוח הגורם לסטייה מתנועתם בקו ישר. איינשטיין לא היה הראשון שחשב על אפשרות זו; למעלה משישים שנה לפניו העלה אותה המתמטיקאי הבריטי ויליאם קליפורד (Clifford), וראו בהמשך.

ב-10 ביוני 1854 פיתח גיאורג ברנהרד רימן (Riemann) גאומטריה חדשה של מרחב רב-ממדי. רימן הציע תמונה פיזיקלית חדשה של מושג הכוח, השונה מהמושג הניוטוני. הוא דימה יצורים "דו-ממדיים" החיים על גיליון נייר. כאשר נקמט את הנייר, הוא עדיין ייראה ליצורים אלו כעולם שטוח, אך כאשר ינסו לנוע על פני הנייר המקומט, הם ירגישו "כוח" מסתורי שימנע מהם לנוע בקו ישר.

קליפורד הרחיב את רעיונו של רימן, וטען כי כיפוף המרחב אחראי לכוח האלקטרומגנטי. הוא הציג את ההשערה כי מרחבים גבוהי-ממדים ואלקטרומגנטיות הם בעצם אותה תופעה, כלומר – כוח אלקטרומגנטי נובע מכיפופו של מרחב רב-ממדי. היתה זו הפעם הראשונה שמישהו טען כי "כוח" אינו אלא תוצאה של עקמומיות המרחב עצמו.

1. טנזור הוא הכללה של וקטור ומטריצה. וקטור הוא טנזור מסדר ראשון (עמודה), מטריצה היא טנזור מסדר שני (טבלה של שתיים על שתיים לפחות).



דחשות שתי קואורדינטות לתיאור מיקומה של החיפושית לאורך כבל החשמל (בכחול) ועל היקפו (באדום)

את מרחקה מהעמוד, אך גם להגדיר קואורדינטה נוספת, שתציין את מיקומה של החיפושית על היקפו של הכבל. יישום העיקרון האומר, כי הטבע נראה לנו פשוט יותר כשמתארים אותו בממדים גבוהים (כלומר, ביותר משלושה ממדים), הוא הרעיון המרכזי שביסוד תורת היחסות הפרטית של איינשטיין. ב-1905 הראה איינשטיין, כי נוח לאחד את המרחב והזמן בתיאוריה ארבעה-ממדית: שלושה ממדי מרחב וממד זמן אחד. הדבר הוליד איחוד של גדלים פיזיקליים כגון חומר ואנרגיה, כפי שבא לידי ביטוי בנוסחה הפיזיקלית המפורסמת ביותר: $E=mc^2$.

מבוא לתורת היחסות הכללית

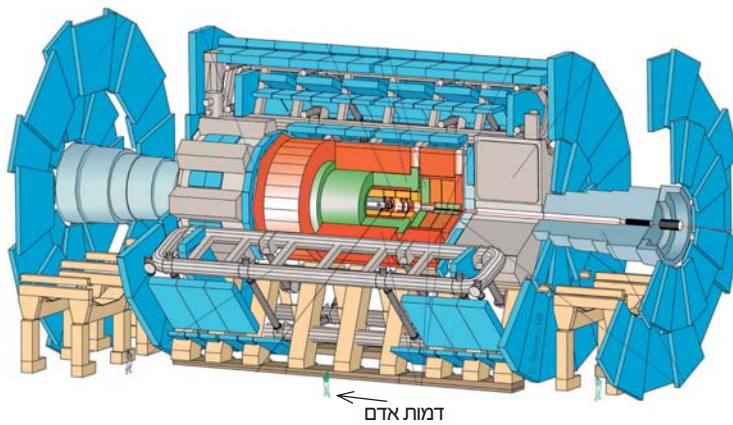
כאשר ניסח איינשטיין את תורת היחסות הפרטית, קבע כי המהירות המקסימלית בטבע היא מהירות האור. משמע, שום גוף איננו מסוגל לנוע מהר יותר, ונוסף על כך שום מידע אינו עובר ממקום למקום מהר יותר ממהירות זו. קביעה זו מתיישבת היטב עם משוואות מקסוול (Maxwell), המתארות את התורה האלקטרומגנטית הקלאסית. לעומת זאת, כאשר בוחנים משיכה כבידתית בין שני גופים לפי תורת הכבידה של ניוטון, נוכחים כי הכוח בין הגופים מתפשט במהירות אינסופית, בסתירה לתורת היחסות הפרטית.

כדי להבין את מקור הבעיה, נתבונן בכדור-הארץ המקיף את השמש. המרחק ביניהם הוא שמונה דקות אור (המרחק

לשם הצגת נקודה במרחב ארבעה-ממדי נצטרך להוסיף עוד קואורדינטה (x,y,z,k) . מובן שמבחינה מתמטית אין כל מגבלה להוספת ממדים כרצוננו. למרבה ההפתעה, גם מנקודת המבט של התיאוריות הפיזיקליות אין מגבלה להוספת ממדים. למרות הפשטות המתמטית, מתעוררים קשיים לא-מבוטלים כאשר מתרגמים את המשוואות הפיזיקליות המנוסחות עבור מרחב תלת-ממדי למרחב מרובה-ממדים. המגבלה האנושית אינה מאפשרת לנו לתפוש ריבוי ממדים; ובכל זאת, מצבנו אינו כל-כך רע.

כאשר אין ביכולתנו להבין בעיה מורכבת, פעמים רבות טוב לפרק אותה לכמה בעיות קטנות ופתירות. והנה, במקום לנסות לדמיין כיצד נראה הממד הרביעי, נוכל לחשוב כיצד היה נראה ממד שלישי ליצור החי בעולם תלת-ממדי אך תפישתו מוגבלת למשטח דו-ממדי (כפי שתפישתנו מוגבלת לתלת-ממד). חשבו על חדר השינה שלכם ועל "נמלה דו-ממדית" קטנה המהלכת על התקרה. הנמלה רואה את עולמה (התקרה, הקירות והרצפה) כמשטח דו-ממדי אחד, ואם ברצונה להגיע אל הרצפה, היא תצטרך לעבור לאורך אחד הקירות, מבצע שיתמשך זמן ניכר. ועתה תארו לעצמכם שהיא פשוט נופלת למטה, ותוך רגע מוצאת את עצמה על הרצפה, בלא שעשתה אפילו צעד אחד. לנו הדבר נראה הגיוני ופשוט, אך תפישתה המוגבלת של הנמלה הדו-ממדית תקשה עליה להבין את התופעה בלי להביא בחשבון את הממד הנוסף, השלישי. מנקודת המבט שלה, היא ניתקה באורח פלא ממקומה והופיעה כעבור רגע במקום חדש.

דרך נוספת לחשוב על הממד הנוסף היא הקטנתו ביחס לאחרים. לשם כך נתאר לעצמנו כבל חשמל שממרחק רב נראה כבעל ממד אחד. כדי לתאר את מיקומה של ציפור העומדת עליו, נזדקק לקואורדינטה אחת בלבד – המרחק מנקודת התחלה, כגון העמוד שמשמאל לכבל. ואולם, אם נתבונן בכבל בעזרת משקפת, נוכל להבחין בממד נוסף – הכבל ייראה לנו כבעל עובי. ממד זה אמנם קטן ביחס לציפור, ולכן אפשר להזניחו כאשר רוצים לתאר את מיקומה, אך לא כך הוא הדבר לגבי חיפושית, שביכולתה גם לנוע סביב כבל החשמל. כדי לתאר את מיקום החיפושית עלינו לציין

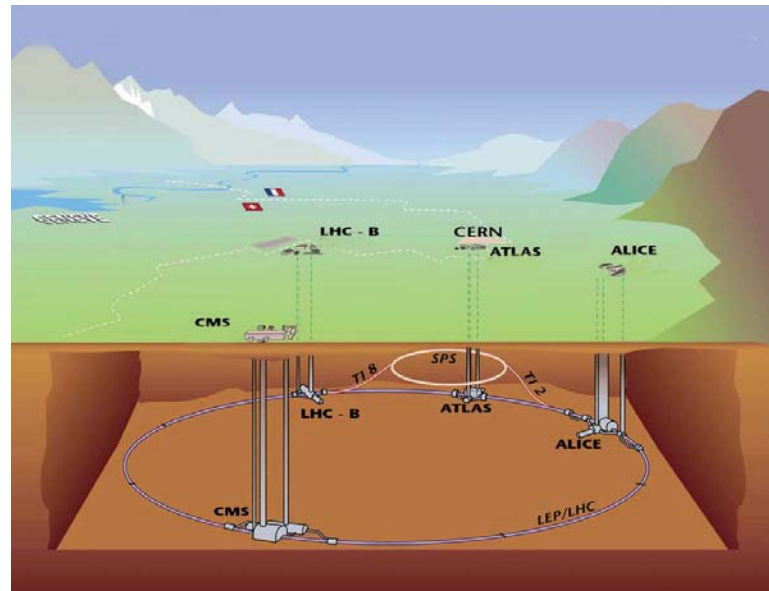


הגלאי אטלס בהשוואה לגודלו של אדם. אלומות הפחוטונים מגיעות משני צדיו ומתנגשות במרכז באנרגיה עצומה. תוצרי ההתנגשות מתפזרים לכל עבר, תוך שהם משאירים את "עקבותיהם" בחלקי הגלאי השונים

המאיץ LHC והגלאי אטלס יסייעו בלא ספק להעמיק את הבנתנו הפיזיקלית המבוססת על המודלים הפיזיקליים הקיימים היום, להשלים את החסר במודלים אלה ולבחון אפשרויות לפיזיקה אקזוטית, כמו פיזיקה של ממדים נוספים.

חיפוש ממדים נוספים ב-LHC

קיימים מודלים רבים המתארים את הפיזיקה במרחבים מרובי-ממדים, וחלקם אף מציעים דרכים לחיפוש ניסויי אחר אותם ממדים נוספים. כיוון שמדובר בממדים קטנים מאוד וסגורים (צורות גאומטריות סגורות, כגון מעגל), אי-אפשר לראותם במישרין, אלא רק לקבל עדות עקיפה



מאיץ החלקיקים LHC המוקם בקרבת ז'נבה, שווייץ, ממוקם כמאה מטר מתחת לאדמה והיקפו כ-27 קילומטרים

על מנת לשחזר את תמונת החלקיקים המתפזרים בהתנגשות, יש צורך בגלאים מתוחכמים מאוד. לבניית גלאים אלו משתמשים בטכנולוגיות הנמצאות על גבול הטכנולוגיה הקיימת. גלאי החלקיקים שישמש במאיץ למטרה זו מכונה "אטלס". קוטרו של אטלס 22 מטר ואורכו 44 מטר (לשם המחשה, חלק של כרבע מגובהו של בניין עזריאלי העגול, מונח על צדו!). הגודל והמורכבות של אטלס נדרשים לצורך תיעוד אירועי ההתנגשות של חלקיקים שגודלם קטן מגודל הגלאי בכ-16 סדרי גודל! (יחס של 16 סדרי גודל הוא, לדוגמה, היחס שבין קוטר כדור-הארץ לקוטרו של אטום בודד). בבניית אטלס משתתפות כ-150 אוניברסיטאות מ-33 מדינות שונות, ובהן קבוצות מאוניברסיטת תל-אביב, ממכון ויצמן למדע ומהטכניון.

מנבאות (כגון ממדים נוספים, חלקיקים כבדים מאוד וכדומה) אינן משפיעות עלינו ישירות, האם נכון לדון בהן במסגרת פיזיקלית, או שמא זהו דיון מתמטי או פילוסופי גרידא?

בחלק הבא של הדיון נצביע על כך, שהיום הוא הזמן המתאים ביותר לדון בנושאים אלה מאז ימי קלוצה וקליין. זאת משום שבמהלך שנת 2009 יחל ניסוי ייחודי, בינלאומי, שבמהלכו נוכל אולי לבדוק אם אכן אנו חיים במרחב-זמן מרובה ממדים.

מאיץ החלקיקים LHC

נניח שברשותנו שק מלא בשעוני יד קטנים, וברצוננו להבין ממה הם מורכבים, עד הקפיץ האחרון, ומהו מנגנון פעולתם. נניח עוד כי אין לנו אפשרות להשתמש בכלים עדינים כמו מברג או זכוכית מגדלת, וכל שביכולתנו לעשות הוא לזרוק את השעונים בעוצמה אל הקיר כדי לפרקם. מהתפרקות השעונים נוכל אולי להבין בסופו של דבר את מנגנון פעולתם, אך כולם יסכימו שהדבר רחוק מלהיות פשוט. פירוק אלים של השעון לגורמיו הוא עניין של כוח, וגם אם התגברנו על כך, אנו עדיין עומדים לפני בעיה: הרי זה אתגר לא-פשוט לפענח את מנגנון פעולתו של השעון על פי שבריו המפוזרים.

מאיץ החלקיקים הנבנה בשווייץ, Large Hadron Collider (LHC), יאיץ פרוטונים ויגרום להם להתנגש זה בזה בעוצמה גדולה, באנרגיה של עד 14,000 גא"ו (גיגה אלקטרון-וולט היא האנרגיה הקינטית של אלקטרון שהואץ במתח של מיליארד וולט) – האנרגיה הגבוהה ביותר שהצליחו חוקרים להשיג במעבדה. בעקבות ההתנגשות, יתפרקו הפרוטונים למאות חלקיקים שונים, שיתפזרו לכל עבר ויזוהו על-ידי הגלאים. על פי התכנון יופעל המאיץ כבר בקיץ זה, בערך בחודש אוגוסט, אך בתחילה יופעל לשם כיול בלבד. הניסוי עצמו יתחיל, על פי התכנית, ב-2009.

← איינשטיין הותיר אותנו עם מרחב-זמן ארבעה-ממדי, אך נוכחנו כבר שאין כל הגבלה פיזיקלית או מתמטית על הוספת ממדים, ולכן לא היה זה אלא עניין של זמן עד שהופיע ממד נוסף.

הוספת ממד חמישי - תיאוריית קלוצה-קליין

ב-1919 הראה המתמטיקאי הפולני תיאודור קלוצה (Kaluza), כי על-ידי "תכסיס" מתמטי של הוספת ממד חמישי למרחב-זמן של איינשטיין, אפשר לשלב בין תורת היחסות הכללית (משוואת איינשטיין) לבין התורה האלקטרומגנטית הקלאסית (משוואות מקסוול). בזה הצליח קלוצה לאחד בפעם הראשונה את תורת הכבידה עם התורה האלקטרומגנטית, ולייחס לשתי תופעות אלו מקור אחד – תכונה גאומטרית של המרחב-זמן. מעט אחר-כך, ב-1926, הוסיף המתמטיקאי השוודי אוסקר קליין (Klein) עוד פרט, והניח כי הממד החמישי הוא קטן מאוד וצורתו מעגלית, בדומה להיקפו של קבל החשמל. קליין טען שעקב כך אי-אפשר להבחין בו ישירות, ולכן העולם שלנו נראה כארבעה-ממדי. פרט למתן תשובה לשאלה, מדוע איננו מבחינים בממד החמישי, הראה קליין דבר נוסף ומעניין לא פחות. הסימטריה של הממד המעגלי הנוסף היא סימטריה המכונה $U(1)$. למרבה הפלא, זו בדיוק הסימטריה היוצרת, לפי משפט נתר, את מה שרובנו מכירים כשימור המטען החשמלי! – מדובר בתכונה חשובה ביותר בתורה האלקטרומגנטית, שלפיה במערכת סגורה המטען החשמלי הכולל נשאר תמיד קבוע. זוהי דוגמה נוספת לסימטריה מרחבית המתורגמת לחוק שימור.

המורשת שהותירו אחריהם קלוצה, קליין ואיינשטיין סללה את הדרך לניסוחה של תורת המיתרים המפורסמת, המחליפה חלקיק נקודתי במיתר זעיר. אך יש התוהים, מה טעם בהעלאת תיאוריות פיזיקליות שאיננו יכולים לבחון אותן? (בסוגיה זו ראו: ברק קול, "הקרב על תורת המיתר", "גליליאו" 105). אם התופעות שתיאוריות אלו

המודל הסטנדרטי

המודל הסטנדרטי מתאר שלושה מארבעת הכוחות הידועים בטבע: הכוח האלקטרומגנטי, הפועל בין היתר בין פרוטון לאלקטרון, הכוח החלש השולט בהתפרקויות רדיואקטיביות, והכוח החזק האחראי על יציבות הגרעין. המודל הסטנדרטי מחלק את הטבע, כפי שאנו רואים אותו כיום, לשתי קבוצות יסודיות: קבוצה של חומר וקבוצה של נושאי כוחות. חלקיקי החומר הם הפרמיונים, בעלי ספין חצי שלם (הספין הוא תכונה קוונטית של החלקיק; הוא מהווה חלק מהתנע הזוויתי הכולל, ואין לו אנלוג קלאסי). חלקיקי הכוחות הם הבוזונים בעלי הספין השלם.

בוזונים			נושאי הכוח ספין = 0, 1, 2, ...		
ספין = 1			ספין = 1		
שם	מסה GeV/c ²	מטען חשמלי	שם	מסה GeV/c ²	מטען חשמלי
γ פוטון	0	0	g גלואון	0	0
W^-	80.4	-1			
W^+	80.4	+1			
Z^0	91.187	0			

פרמיונים			חלקיקי חומר ספין = 1/2, 3/2, 5/2, ...		
ספין = 1/2			ספין = 1/2		
טעם	מסה GeV/c ²	מטען חשמלי	טעם	מסה מקורבת GeV/c ²	מטען חשמלי
ν_e electron neutrino	$<1 \times 10^{-8}$	0	u up	0.003	2/3
e electron	0.000511	-1	d down	0.006	-1/3
ν_μ muon neutrino	<0.0002	0	c charm	1.3	2/3
μ muon	0.106	-1	s strange	0.1	-1/3
ν_τ tau neutrino	<0.02	0	t top	175	2/3
τ tau	1.7771	-1	b bottom	4.3	-1/3

באופן קלאסי, הכוח האלקטרומגנטי מתואר בעזרת משוואות מקסוול. לעומת זאת, במודל הסטנדרטי הוא מתואר על-ידי אלקטרודינמיקה קוונטית (Quantum Electrodynamics - QED). אלקטרודינמיקה קוונטית מתארת את האינטראקציה האלקטרומגנטית בין שני חלקיקים טעונים חשמלית בעזרת החלפת פוטון (בוזון בעל ספין 1) וירטואלי. אלקטרודינמיקה קוונטית היא התיאוריה המדויקת ביותר בפיזיקה כיום, והיא נמדדה בדיוק של אחד לעשרה מיליון.

הכוח החלש מתאר אינטראקציות בין משפחת ה"לפטונים" (אלקטרון, מיאון, טאו וחלקיקי הניטרינו הצמודים להם). פעולת הגומלין בין הלפטונים, כמו פעולת שאר הכוחות, מתבצעת על-ידי חילוף חלקיק בוזוני, בעל ספין 1, המעביר את הכוח החלש (W^+ , W^- , Z_0).

הכוח החזק מתואר על-ידי כרומודינמיקה קוונטית (Quantum Chromodynamics - QCD). תיאוריה זו קובעת כי הפרוטונים, הניטרונים ושאר החלקיקים הכבדים אינם חלקיקים יסודיים אלא בנויים מחלקיקים קטנים יותר – הקווארקים. ישנם קווארקים בשלושה "צבעים" ושישה "טעמים", והאינטראקציה החזקה ביניהם מועברת על-ידי חלקיק בוזוני הנושא את הכוח החזק ונקרא "גלואון".

למודל הסטנדרטי יש לא מעט חסרונות. למשל, הוא אינו מתאר את כוח הכבידה, והוא דורש כ-19 פרמטרים חופשיים (כגון מסת האלקטרון), שאת ערכם צריך לקבוע בניסוי. למרות חסרונות אלו, כל ניסוי שנעשה עד היום תואם מודל זה. ובכל זאת, אנו מחפשים אחר תיאוריה כללית ושלמה יותר. ■





לקיומם. הדרך היא להתבונן באופן ניסויי בפיזיקה בארבעה ממדים, ולחפש את הסטיות שאותן מנבאות תיאוריות גבוהות-ממדים.

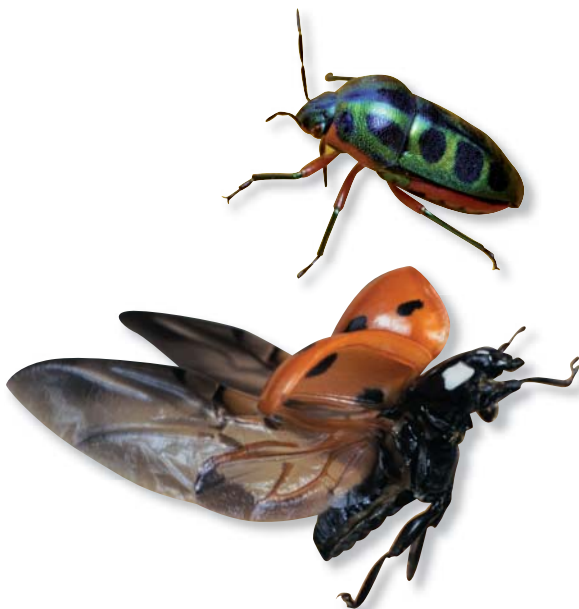
עקב ריבוי המודלים ומורכבותם המתמטית, לא נוכל להזכיר את כולם במאמר זה. נאמר רק כי על פי רוב הם נבדלים זה מזה ביחסי הגומלין שלהם עם העולם הארבעה-ממדי. למשל, מודלים אחדים מנבאים כי הגרביטון (חלקיק הנושא את כוח הכבידה) יכול לנוע בממדים הנוספים, ובשל כך כוח הכבידה חלש משאר הכוחות במידה כה ניכרת (כ-40 סדרי גודל!). כדי לאמת מודלים אלו במסגרת ניסוי ה-LHC, אפשר "לחפש" את הגרביטון, או – ליתר דיוק – את אי-הימצאותו בין תוצרי ההתנגשות של שני הפרוטונים. אם הגרביטון אכן מסוגל לנוע בממדים נוספים, כאשר נסכום את האנרגיה של כל החלקיקים שנוצרו בהתנגשות, נצפה לגלות כי חסרה כמות מסוימת של אנרגיה, וזו תהיה חתימה המעידה על הימצאותו של הגרביטון ויכולתו לנוע בממדים נוספים.

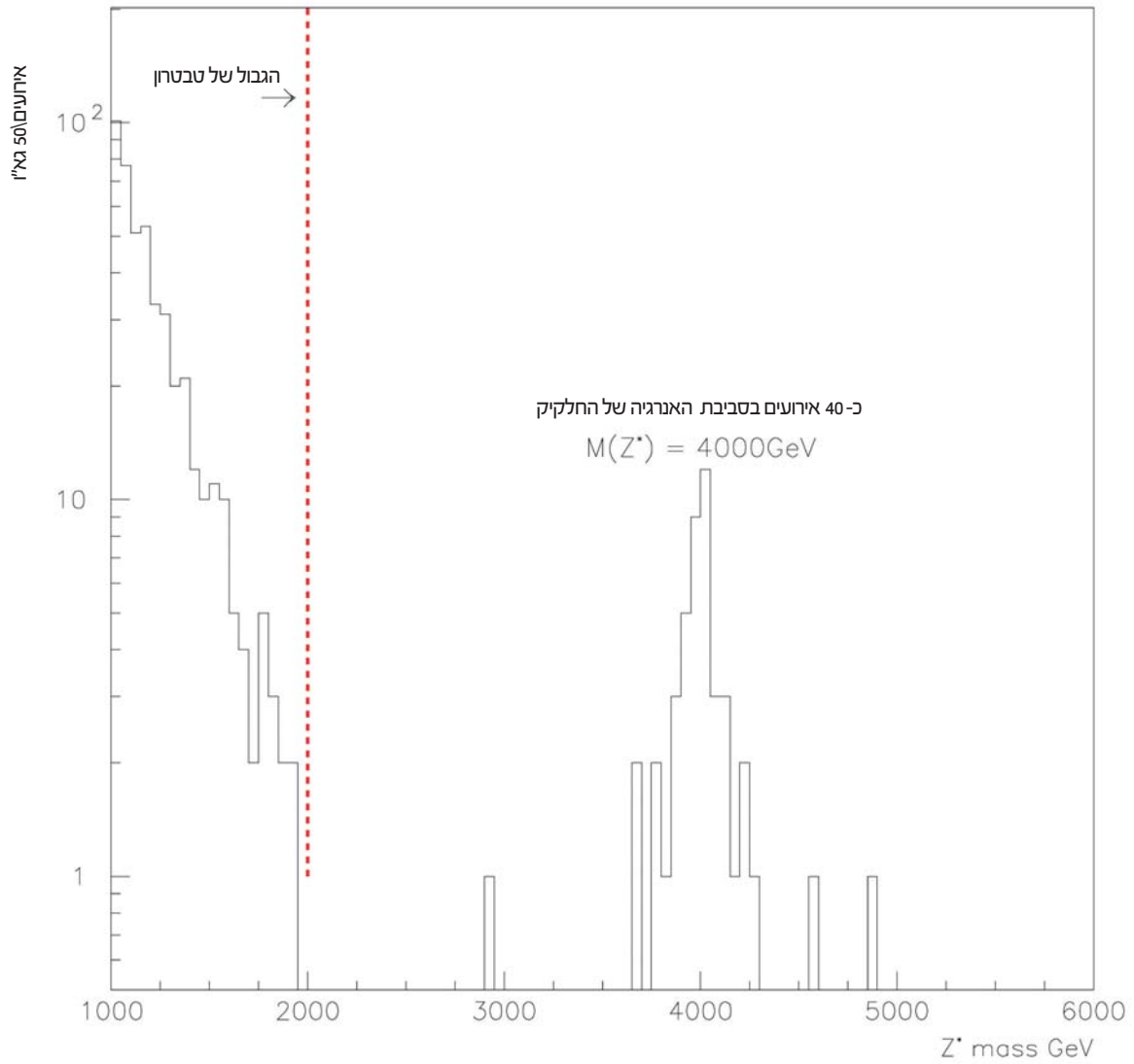
במאמר זה נתרכז במודל הנובע מתיאוריית קלוזה-קליין. מודל זה מנבא את קיומו של חלקיק חדש – Z^* , קרוב משפחה של הבוזון Z_0 מהמודל הסטנדרטי (על החלקיקים במודל הסטנדרטי, ראו תיבה להלן). חלקיק חדש זה נוצר בממד הנוסף; איננו יכולים "לראות" אותו ישירות והוא הרבה יותר כבד מה- Z_0 . מכיוון שטרם ראינו עדויות לקיומו של חלקיק זה בניסוי, אפשר רק להעריך חסם תחתון על המסה שלו, שכיום עומד על כ-4,000 גא"ו (כבד בערך פי 20 יותר מהחלקיק האלמנטרי הכבד ביותר המוכר כיום – top quark). המאיץ החזק ביותר כיום, הטבטרון (Tevatron) שבארצות-הברית, מסוגל להאיץ פרוטון ואנטי-פרוטון (פרוטון בעל מטען שלילי) לאנרגיה מקסימלית של כ-2,000 גא"ו. אנרגיה זו אינה מספיקה כדי ליצור את Z^* . לעומת זאת, ב-LHC האנרגיה המקסימלית תהיה 14,000 גא"ו, וכך ייפתח חלון אנרגטי ליצירת ה- Z^* , כלומר, תהיה מספיק אנרגיה ולכן גם "מספיק מסה" (לפי השקילות בין אנרגיה ומסה בתורת היחסות הפרטית), ליצירת חלקיק בעל מסה כה גדולה.

כאשר פרוטונים מתנגשים באנרגיות כה גבוהות, ההתנגשות שמתרחשת בפועל היא בין החלקיקים שמהם

הפרוטונים בנויים – הקווארקים והגלואונים. אותנו מעניינת התנגשות בין זוג קווארקים. כל אחד מהם נושא איתו אחוז מסוים מאנרגיית הפרוטון שאליו הוא שייך, ולכן אנרגיית ההתנגשות בין שני הקווארקים בסך-הכל קטנה מהאנרגיה המשותפת של שני הפרוטונים. הדבר דומה לשתי קליפות זכוכית כדוריות (פרוטונים) שבמרכז כל אחת מהן קבועים שלושה כדורי ברזל (קווארקים). כאשר שתי קליפות הזכוכית יתנגשו במהירות קטנה יחסית, הזכוכית תחזיק מעמד והקליפות תתפזרנה זו מזו. אך אם מהירותן גדולה מספיק, הזכוכית תישבר מיד וההתנגשות בפועל תתרחש בין שניים מכדורי הברזל.

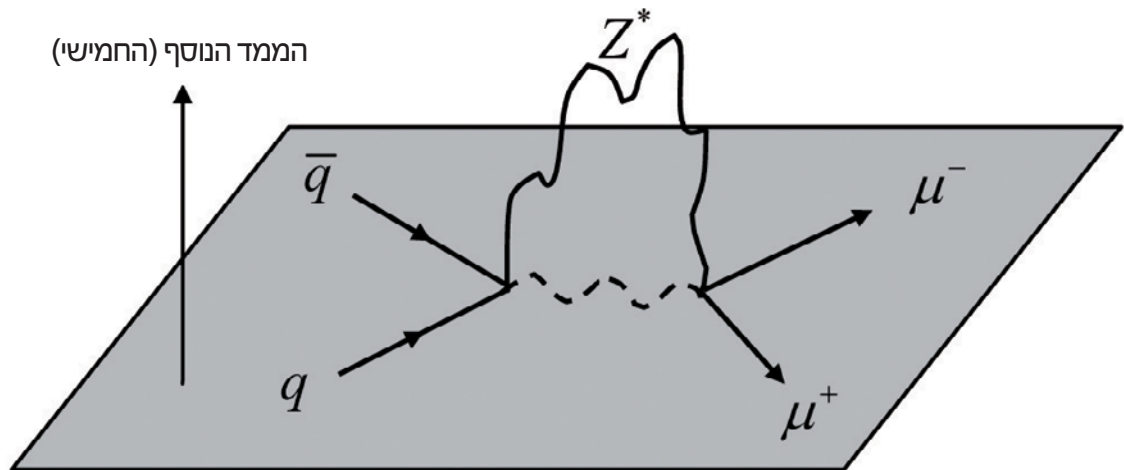
אם כך, התהליך המעניין אותנו הוא תהליך המתחיל בהתנגשות (המתרחשת בארבעה ממדים) בין שני קווארקים היוצרים את החלקיק Z^* בממד הנוסף. בסופו של התהליך, Z^* מתפרק לשני חלקיקים בארבעה ממדים: מיאון ואנטי-מיאון, שאותם נחפש בגלאי. לפני תחילת הניסוי, נהוג לנסח את התהליך באופן מתמטי במסגרת המודל העומד לבדיקה. בעזרת תוכנת מחשב בונים הדמיה מציאותית ככל האפשר, המאפשרת לשנות את הפרמטרים החופשיים ובכך להתאים את המודל לנתוני הניסוי שיתקבלו. לאחר ביצוע הניסוי והשוואת תוצאותיו לתוצאות ההדמיה, אפשר לקבוע את ערכיהם של הפרמטרים החופשיים בפועל וכך לפסול או לאמץ את המודל.





תוצאות ההדמיה של תהליך היצירה וההתפרקות של החלקיק Z^* : אפשר לראות שייא באזור 4,000 גא"ו, המייצג את מספר החלקיקים שהיו נוצרים בשנת עבודה של המאיץ. רחב השיא מייצג את ה"חלון האנרגטי" שנפתח ליצירת החלקיק. המאיץ LHC מאפשר להשיג אנרגיה גבוהה מאי-פעם ולצפות אל מעבר לגבול הנוכחי - כ-2,000 גא"ו, של המאיץ טבטרון





4 ממדים

תיאור סכמטי של תהליך היווצרות החלקיק Z^* בממד הנוסף. המשטח מייצג את העולם הארבעה-ממדי שבו אנו חיים, והממד החמישי מאונך לו ונסתר מעינינו

לזנוח את ההתפלגות האחידה ולתת חשיבות שונה לאזורים שונים. כך, לאחר התייעצות עם מומחה כדורגל, אפשר גם לייחס לכל שחקן את ההתפלגות המאפיינת אותו. בסופו של דבר נוכל להשתמש בהדמיה כדי לנבא (בדיוק התלוי בטיבה) את הסיכוי להצלחה של בעיטות עונשין של קבוצות כדורגל אמיתיות, בתנאי שנדע בכל פעם מי הבועט ומי השוער.

לפי קו המחשבה הזה, בנתה קבוצת המחקר שלנו באוניברסיטת תל-אביב הדמיה של תהליך היצירה וההתפרקות של החלקיק Z^* . תוכנת המחשב שכתבנו "מגרילה" באופן אוטומטי אירועי התנגשות המתאימים להתפלגות התיאורטית המייצגת את התהליך. בניסוי עתידי, נראה בגלאי את התוצרים (מיואון ואנטי-מיואון), ולהם החתימה האופיינית לחלקיק שיצר אותם - Z^* . תוצאת ההדמיה מוצגת בהיסטוגרמה המתארת את מספר החלקיקים שייצרנו כתלות באנרגיה של שני הקווארקים שהתנגשו. בעזרת היסטוגרמה זו נוכל לנבא מהו מספר החלקיקים Z^* שנראה בניסוי בפרק הזמן שלאחר התחלת המדידה, ובתנאי שהחלקיקים אכן קיימים.

על מנת להבין טוב יותר מהי ההדמיה שעלינו לבנות כדי לתאר את הניסוי ולבדוק את המודל המתאים, נחשוב על בעיטות עונשין מ-11 מטרים בכדורגל, ונבנה הדמיה המתארת את התהליך. לשם פשטות, נחלק את מסגרת השער לשישה אזורים שווים, הממוספרים מ-1 עד 6. נבחר שחקן ונציב שוער מולו בשער. נניח שהשחקן בועט בהסתברות שווה לכל אחד מששת האזורים, וגם השוער בוחר בהסתברות שווה אזור אחד מתוך השישה שאותו הוא חוסם בוודאות. כדי לקבוע איזה מהאזורים יבעט השחקן, נגריל מספר מ-1 עד 6 בעזרת קובייה. באותו אופן נגריל מספר נוסף כדי לקבוע איזה אזור יחסום השוער. לגול ייחשב מצב שבו השוער קפץ לאזור שונה מזה שאליו בעט השחקן. לאחר שנחזור על התהליך הבסיסי הזה מספר רב של פעמים, נוכל לסכם כמה תכונות של התהליך, כמו כמה בעיטות נכנסו לשער, כמה מהן עצר השוער, מהו האזור המועדף על השחקן ומהו האזור המועדף על השוער. מובן שבדוגמה זו הגדרנו מראש הסתברות אחידה לכל אזור (בבעיטה ובחסימה), אך אם נרצה לדמות תהליך מציאותי יותר, נצטרך



ממדים נוספים. חברי הקבוצה הם פרופ' ארז עציון, פרופ' ירון עוד, ד"ר גדעון בלע ושני המחברים. קבוצה זו משתפת פעולה עם קבוצות דומות בעולם.

**ביום ד' 27.8.08, בשעות 19:00-22:00, יתארח
יבגני יורקובסקי ונועם הוד בפורום "גלילאו" וישמחו
לענות על שאלותיכם. המעוניינים מוזמנים לפורום
מדע וחברה באתר "גלילאו":
www.ifeel.co.il/galileo**

לקריאה נוספת:

בריאן גרין, היקום האלגנטי, מאנגלית: עמוס כרמל, הוצאת מטר, 2000. הספר פותח ברקע נרחב ופופולרי על מכניקה קוונטית ויחסות כללית, מראה את אי-ההתאמה ביניהן, ודרכה מגיע לתורת המיתרים מרובת-הממדים.

מיצ'ו קאקו, "על-מרחב", הוצאת מעריב-הד ארצי, 1998. הספר עוסק בהתקדמות המחשבה על ממדים נוספים ובפיזיקה המתקבלת בעקבות שינויים אלה.

אתר CERN, שבו תמצאו מידע על ההכנות לניסוי הגדול ביותר בהיסטוריה האנושית. האתר כולל הסברים פופולריים על טבעו של הניסוי, וקטעי וידיאו ואנימציות הממחישים את תהליך ההתנגשות של החלקיקים, את תוצרי ההתפרקות ואת איסוף המידע לצורך חיפוש אחר פיזיקה חדשה:
<http://public.web.cern.ch/Public/Welcome.html>

המיתרים (שצמחה מתיאוריית קלוצה-קליין ומצריכה 11 ממדים), המצליחה לאחד את כוח הכבידה עם שלושת הכוחות הנותרים בטבע. לכן, עד שתופיע חלופה, גם אם לא נצליח למצוא ממדים נוספים בקרוב, פיזיקאים רבים ימשיכו לחקור תחום זה.

סיכום

נוכחנו כי סימטריה של המרחב-זמן מגדירה גדלים שמורים בתיאוריה, וכי הוספת ממדים נוספים מפשטת את הפיזיקה ומאפשרת איחוד אלגנטי של ארבעת הכוחות שבטבע. זוהי אחת הסיבות לכך שאנשים מאמינים כי יש בטבע ממדים נוספים, כפי שאמר הפיזיקאי והסופר פול דייוויס (Davies) על הצפוי לנו אם נפתור את בעיית איחוד הכוחות לכוח יחיד:

"נוכל לשנות את מבנה המרחב והזמן, לקשור קשרים משלנו באין ולבנות חומר לפי הזמנה. השליטה בכוח-העל תאפשר לנו ליצור חלקיקים ולהמירם זה בזה כאוות נפשנו, וכך נפיק צורות אקזוטיות של חומר. אולי אפילו נוכל לשחק בממדיות של המרחב עצמו, וליצור עולמות מלאכותיים משונים, בעלי תכונות בל-ישוערו. אז נהיה שליטי היקום, באמת ובתמים."

(הציטוט בתוך: מיצ'ו קאקו, "על-מרחב", ראו

■ "לקריאה נוספת".)

יבגני יורקובסקי ונועם הוד הם תלמידי מחקר בבית-הספר לפיזיקה ואסטרונומיה על שם בברלי וריימונד סקלר, אוניברסיטת תל-אביב.

באוניברסיטת תל-אביב פועלת קבוצה גדולה הכוללת אנשי סגל בכירים, טכנאים ותלמידים לתארים מתקדמים, המשתתפים בבנייתו ובהפעלתו של הגלאי אטלס במאיץ LHC. כמו כן, בשנת 2006 נוסדה קבוצה המחפשת אחר פיזיקה חדשה שמעבר למודל הסטנדרטי, ובין היתר, גם אחר





במודל זה כמה פרמטרים חופשיים, דוגמת המסה של החלקיק Z^* ועוצמת יחסי הגומלין שלו עם שאר החלקיקים. כאמור, כיוון שהמודל אינו קובע מראש את הגדלים האלו, יש לנו חופש לבחור אותם כרצוננו. רק לאחר ביצוע המדידות, בתנאי שנראה אירועים שיש בהם עדויות לכך שהחלקיק אכן נוצר, נוכל לקבוע פרמטרים אלו ולקבוע חד-ערכית מהו המודל המתאים ביותר. אך כל נשכח את מטרתנו העיקרית: אם וכאשר נמצא את Z^* , נוכיח כי קיים לפחות עוד ממד אחד נוסף – ממד חמישי! – כיוון שקיומו של החלקיק קשור ישירות לתיאוריה החמישה-ממדית של קלוצה-קליין.

ייתכן שמן התיאור נוצר רושם, שכל שנותר עכשיו הוא להרים את מתג המאפיץ ולחכות למדידות מהגלאי. ואולם, אין זה המצב. כאמור, מדובר בחלקיק כבד במיוחד, ויהיה קשה מאוד לגלותו בגלאי. יתרה מזו, יש גם מודלים אחרים, שאינם מתבססים על קיומם של ממדים נוספים, המנבאים קיום של חלקיקים בעלי תכונות דומות. אפילו אם נמצא שיא ברור במסה של 4,000 גא"ו, נצטרך לבצע מבחנים נוספים על מנת לקבוע בוודאות מיהו החלקיק שגילינו.

מבט לעתיד

עד היום לא נמצאו ראיות ניסוייות לקיום ממדים נוספים, אך אפשר לקוות שהמאפיץ החדש LHC יפתח אפשרות למצוא עדויות לקיומם, מה שישנה באופן דרמטי את ההבנה שלנו לגבי העולם שבו אנו חיים. תיאוריות הכוללות ממדים נוספים, אשר בעיני פיזיקאים רבים נחשבות ל"משחקים מתמטיים" גרידא, יהפכו להיות פיזיקליות ויהיה אפשר להכריז על מספר רב של מודלים פיזיקליים קיימים כפסולים. אם אכן יתגלו ממדים נוספים, זו תהיה אחת התגליות החשובות בפיזיקה לאורך כל ההיסטוריה. אם לא נגלה ממדים נוספים במסגרת ניסוי ה-LHC, עדיין לא נפסול את המודלים הכוללים אותם, כיוון שתמיד אפשר להניח שהממדים קטנים עוד יותר (עד "אורך פלנק"), ולפיכך, שנחוצה אנרגיה גבוהה יותר כדי למצוא אותם. יש לציין גם כי אין כיום תיאוריה פרט לתיאוריית

מהי טמפרטורה?

מה יקרה אם נכניס לחדר אחד חפצים בעלי טמפרטורות שונות? מניסיון אנו יודעים, שהחפצים החמים יותר יתקררו והקרים יתחממו עד שיווצר שיווי משקל – קרי: עד שהטמפרטורות שלהם ישתוו. טמפרטורת הגופים מצביעה על כיוון זרימת החום ביניהם, מהגוף החם לגוף הקר. אך מהי משמעות הטמפרטורה בגז חלקיקים ברמה המיקרוסקופית? במילים אחרות, מה ההבדל בין חלקיקים חמים לחלקיקים קרים? התשובה בקצרה – מהירות התנועה שלהם שונה. חלקיקים חמים נעים מהר יותר מחלקיקים קרים, ולכן האנרגיה הקינטית שלהם (האנרגיה שיש להם מתוקף היותם בתנועה) תהיה גדולה יותר. כדי לסבר את האוזן, הנה מעט מספרים: מולקולות חנקן, N_2 , המהוות את המרכיב העיקרי באוויר, נעות בטמפרטורת החדר ($25^{\circ}C$) במהירות ממוצעת של כ-500 מטרים לשנייה. יותר ממהירות הקול! באנטארקטיקה הטמפרטורות צונחות בחורף עד לכדי $70^{\circ}C$ -. שם נעות מולקולות החנקן במהירות ממוצעת של כ-200 מטרים לשנייה בלבד.

טמפרטורה היא גודל מאקרוסקופי, כלומר, היא אינה מוגדרת עבור חלקיק בודד, אלא רק עבור מספר רב של חלקיקים. המדחום בחדר מראה $25^{\circ}C$, אך מהירות המולקולות המרכיבות את האוויר רחוקה מלהיות אחידה: המולקולות נעות לכיוונים שונים ובמהירויות שונות. לרוב, ההתייחסות למהירות הממוצעת של החלקיקים כמדד לטמפרטורה תהיה נכונה. עם זאת, לא תמיד יהיה אומדן זה מתאים. למשל: תארו בדמיונכם שולחן ביליארד שעליו נעים כדורים בלא חיכוך במהירויות שונות, ומתנגשים בלא הרף זה בזה ובדפנות. תנועת הכדורים על השולחן היא דו-ממדית, אך מבחינתנו זהו מודל טוב לגז אטומים, כאשר כל כדור מייצג אטום.

השנה היא 1924. קיץ. אלברט איינשטיין, חתן פרס נובל לפיזיקה ואישיות ידועה כבר באותם הימים, מקבל מכתב, חריג בתוכנו, מאת חוקר הודי אלמוני בשם סטיינדרה נת בוזא (Satyendra Nath Bose). "מצורף למכתב מאמר פרי עטי", הוא כותב ומבקש, "קרא אותו, ואם אתה מסכים עם התיאוריה המפורטת בו, פרסמו!". לטענת בוזא, הוא לא הצליח לשכנע את עורכי המגזין המדעי שאליו פנה בצדקת התיאוריה. אמונתו בה היתה כה רבה, עד שלא היסס לפנות לפיזיקאי המפורסם.

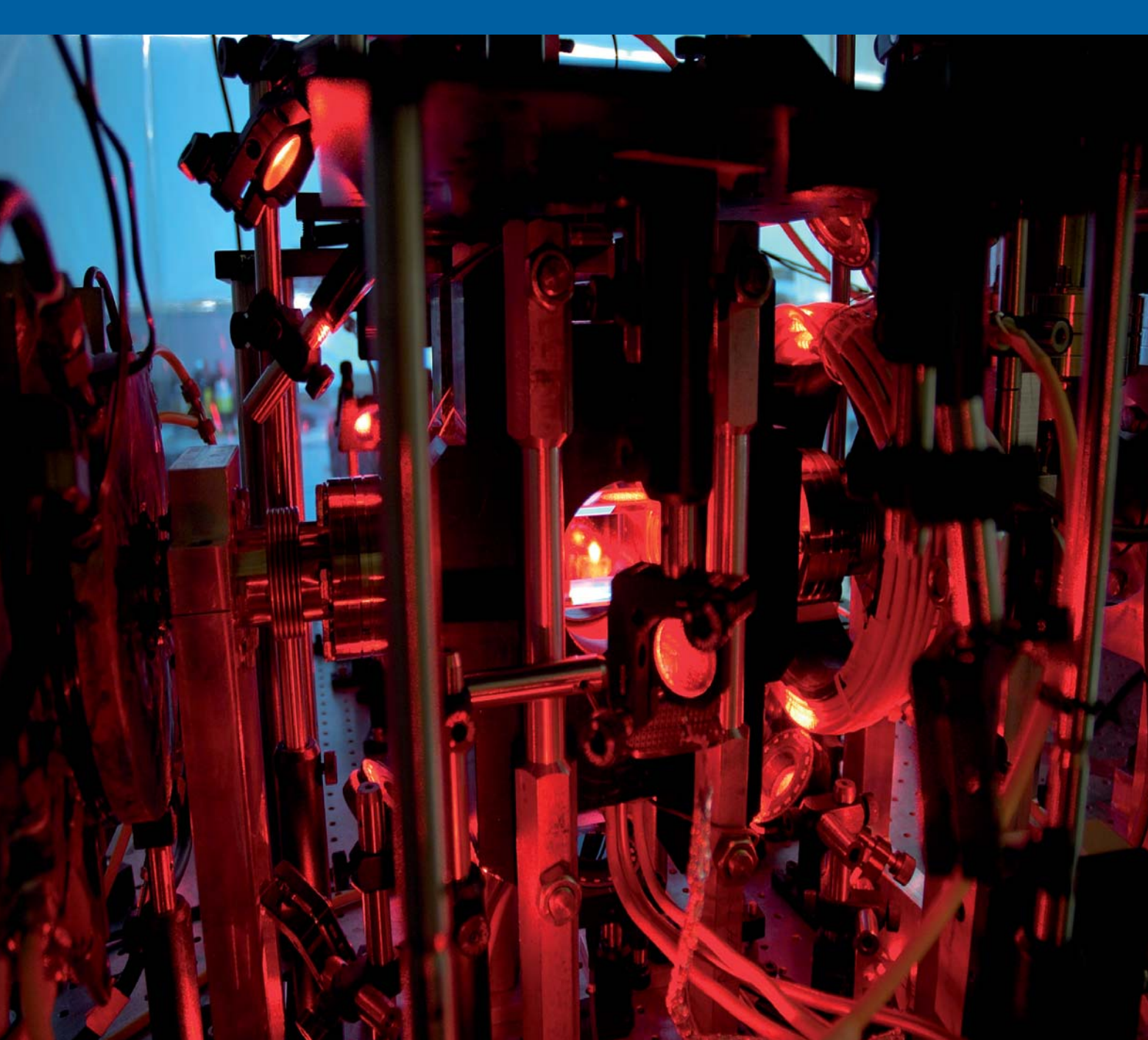
איינשטיין קרא, התרשם מאוד וניצל את השפעתו כדי לפרסם את המאמר. אך הוא לא עצר כאן, ופרסם מיד עוד שני מאמרים המרחיבים את התיאוריה וחוזים את היווצרותה של תופעה אשר לימים תיחשב לגביע הקדוש של הפיזיקה המודרנית. תופעה זו תיקרא על שם שני החוקרים "Bose-Einstein Condensation" – "עיבוי בוזא-איינשטיין". בחיפושם אחריה, יצאו פיזיקאים ברחבי העולם למירוץ עיקש, שבו ניסו לקרר גז אטומים לטמפרטורה הנמוכה ביותר. המירוץ הסתיים רק 70 שנה מאוחר יותר, ב-1995.

תחום האטומים הקרים הולך ומתפתח, והיה לנדבך חשוב במחקרים המשתמשים במדידות מדויקות של זמן (שעונים אטומיים) וקבועי טבע. יתרה מזו, אטומים קרים משמשים כמצע מצוין לבדיקת תופעות פיזיקליות הצפויות לפי מכניקת הקוונטים. אטומים כגון רובידיום, נתרן, ליתיום ועוד כבר הפכו למושא מחקר במעבדות רבות בעולם! ארבע מהמעבדות ממוקמות בישראל: בטכניון, במכון ויצמן למדע, באוניברסיטת בן-גוריון בנגב והמעבדה שלנו – באוניברסיטת בר-אילן.

במאמר זה נסקור בקצרה את התחום ונספר על הנעשה במעבדתנו.

1. אטומים אלה שייכים כולם לקבוצת היסודות האלקליים; מכיוון שמבנה רמות האנרגיה שלהם פשוט יחסית, בזכות האלקטרון הבודד בקליפה החיצונית, קל יחסית לבצע בהם קירור על-ידי ליזר, המתבסס על המעברים בין הרמות השונות. אך כיום כבר מקררים גם אטומים שאינם אלקליים, כגון כרום.



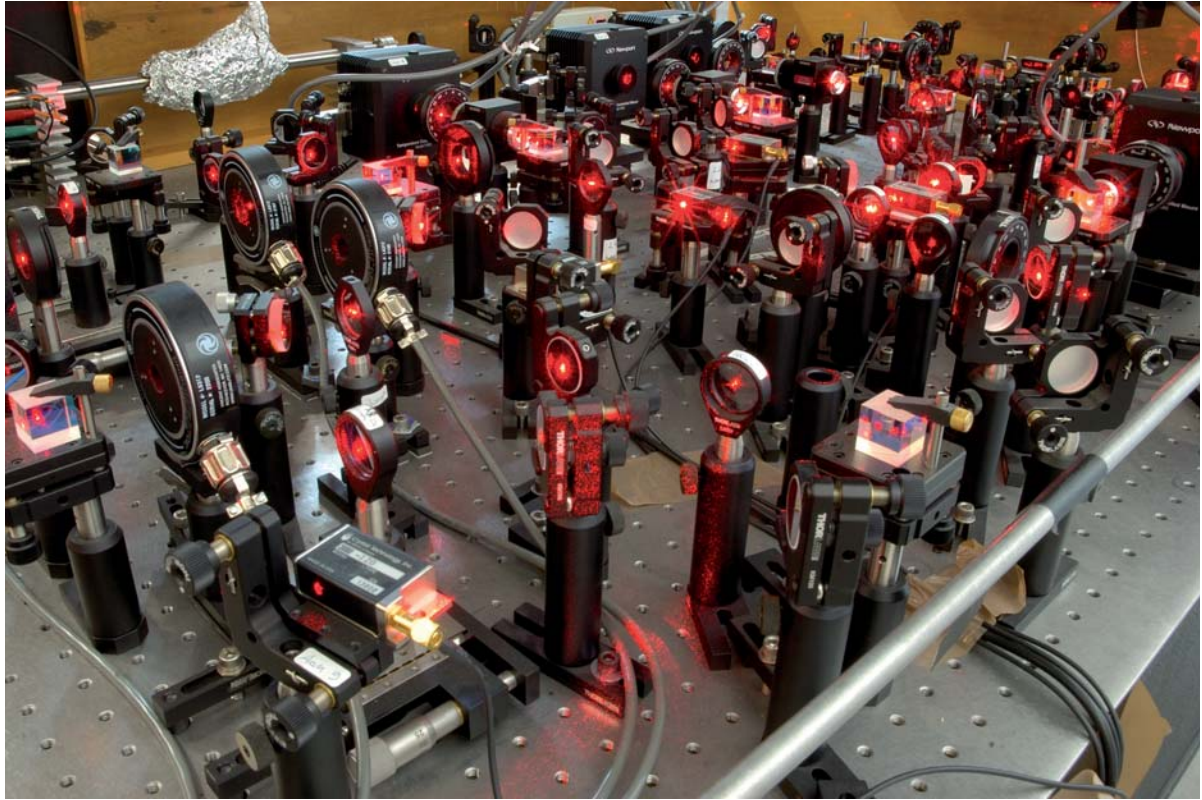


נועם גרוס ולב חייקוביץ

תצלומים: נועם גרוס

המקום הקר ביותר ביקום

עם קרן לייזר - כמעט עד האפס המוחלט



תמונה 1 מקצת הלייזרים המשמשים אותנו בניסוי

המפגש החזיתי יאטו האטומים, וטמפרטורת הגז תרד. לשם כך נחצה שיטה שתמייין את האטומים לפי מהירותם. במילים אחרות, אנו רוצים שהאור שנקרין "יתקשר" רק עם אטומים הנעים במהירות מסוימת לקראתו, ויהיה "שקוף" לאטומים במהירויות אחרות, כאלו המתרחקים ממנו. הלייזר הוא מועמד טבעי לצרכים אלו. יתרונו העיקרי בכך שהוא מייצר קרן חד-צבעית (מונו-כרומטית) חזקה, שהתדר שלה ניתן לכוונון עדין באמצעים שונים. בזכות תכונה זו אפשר "לייצר" פוטונים רבים בתדר מסוים מאוד, הנמצא בתהודה עם האטומים. אור רגיל, לעומת זאת, גם בהספק גבוה, הוא בעל ספקטרום תדרים רחב, ולכן רק חלק קטן מאוד מהפוטונים שהוא מייצר יהיו בתהודה, ואילו

ב-1975 הוצע לראשונה כי תהליך בליעה ופליטה של פוטונים באטומים יכול לשמש לקירורם. העיקרון הוא כדלקמן: אם, טרם המפגש ביניהם, האטום והפוטון נעים זה לקראת זה, אזי תנועת האטום תואט כתוצאה מהסיפוח. באותה מידה, האטום יאיץ אם הפוטון, הנע במהירות האור, "יפגע בו מאחור". הדבר דומה לרכיבה על אופניים עם כיוון הרוח אונגדה. הרוכב בדוגמה זו הוא האטום, והרוח היא שטף הפוטונים הפוגעים בו. כאשר נכוון קרן אור בתדר המתאים לתוך גז אטומים הנעים בכיוונים שונים, חלק מהאטומים יאטו, בעוד אחרים יאיצו, אך המהירות הממוצעת לא תשתנה בהרבה. כדי לקרר את הגז עלינו ליצור מצב שבו פוטונים ייבלעו רק באטומים הבאים לקראתם. בעקבות





קירור באמצעות ליזר – היסטוריה

בשנת 1905 זעזע איינשטיין את עולם הפיזיקה כאשר העלה מחדש טיעון ישן, כי האור מורכב מחלקיקים. הרעיון עורר התנגדות רבה מאוד בקהילה המדעית, ובמידה של צדק: ניסויים רבים, כגון התאבכות ועקיפה, כבר ביססו את התיאוריה שהאור הוא גל אלקטרומגנטי. הטענה החדשה עמדה כביכול בסתירה למה שהיה ידוע עד אז. אך לא לדעת איינשטיין. הוא הסביר כי האור יכול להיות גם חלקיק וגם גל בו-זמנית. העולם היה צריך כמה שנים כדי לעכל את הטענה המהפכנית, אך זיכה על כך את הפיזיקאי בפרס נובל ב-1921. היום, כל תלמיד פיזיקה מתחיל מכיר את עיקרון השניות (דואליות) גל/חלקיק, העומד במרכזה של מכניקת הקוונטים. חלקיקי האור, הנקראים פוטונים, הם חסרי מסה, אך יש להם תנע (גודל פיזיקלי המציינ כי נדרש כוח על מנת לעצור את החלקיק). לכל פוטון יש גם אנרגיה התלויה בתדר הגל האלקטרומגנטי שהוא חלק ממנו. מבבלב? בצדק. נחזור על כך שוב: הפוטון הוא גם חלקיק בעל אנרגיה ותנע מסוימים, וגם חלק מגל, ולכן מוגדר על-ידי התדר שלו. ככל שתדר הגל גבוה יותר, אנרגיית הפוטון והתנע שלו גדולים יותר. נראה שבאמת היה צריך מדען מסדר הגודל של איינשטיין על מנת להעלות רעיון כה מהפכני.

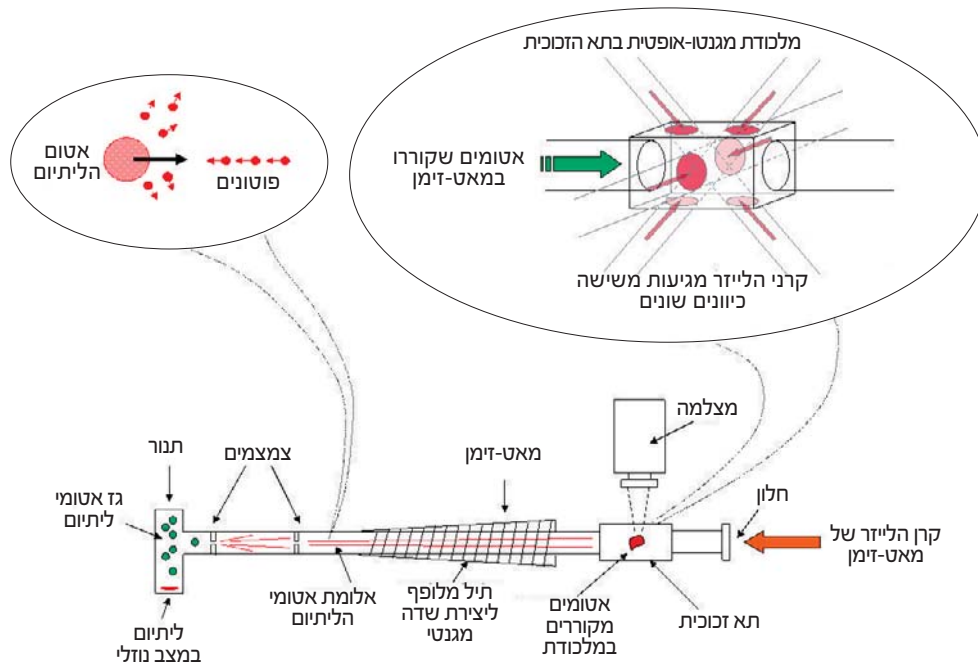
מעניינת במיוחד האינטראקציה בין חלקיקי האור לחלקיקי החומר. לאטום יש יכולת "לבלוע" פוטונים, בתנאי שהאנרגיה שלהם מתאימה לאנרגיית מעבר פנימית שלו, קרי: אנרגיה ה"מקפיצה" אלקטרון השייך לו ממסלול אחד סביב גרעין האטום למסלול אחר, רחוק יותר. מכיוון שהמסלולים מוגדרים היטב, האנרגיות המתאימות למעברים אלו הן בדידות. כאשר יש התאמה, נהוג לומר כי האור נמצא בתהודה (רזוננס) עם האטום. כאשר האטום "בולע" פוטון הוא מספח אליו לא רק את האנרגיה, אלא גם את התנע של חלקיק האור. לאחר פרק זמן מסוים (זמן החיים של האלקטרון במסלול הרחוק), "ייפול" האלקטרון חזרה למסלול קרוב יותר, והאטום יפלוט את האנרגיה שהשתחררה כפוטון בכיוון אקראי.

כפי שציינו, הטמפרטורה על השולחן מוגדרת לפי המהירות הממוצעת של הכדורים הנעים עליו (ליתר דיוק, ממוצע המהירות בריבוע). בהינתן שני שולחנות, נוכל לדעת בקלות באיזה מהם הכדורים יותר "חמים", וזה לפי מהירות התנועה שלהם. אך מה יקרה אם נציב את אחד השולחנות על רכבת מהירה, בעוד האחר יישאר על הרציף? למהירות הכדורים בשולחן הראשון נוספה מהירות הרכבת. האם בשל כך עלתה הטמפרטורה שלהם? התשובה היא לא. אפשר להוכיח זאת בקלות על פי עקרון היחסות, שהרי צופה על הרכבת יכול לטעון באותה המידה שדווקא הכדורים שעל הרציף הם המהירים יותר. ואף זאת: כדור-הארץ אמנם נע סביב השמש במהירות של כ-100,000 קמ"ש, אך ברור שאין לכך כל השפעה על הטמפרטורה בכוכב-הלכת שלנו, שאם לא כן היינו כולנו בצרה צרורה. נראה כי ההגדרה הקושרת את הטמפרטורה רק עם המהירות הממוצעת של החלקיקים אינה מספיק מדויקת. אכן, הגדרה זו נכונה רק בתנאי שמדידת המהירויות מתייחסת למערכת שבה מרכז המסה של החלקיקים נייח, ולפיכך המדידה חייבת להתבצע כאשר אנו עומדים במנוחה ליד השולחן ולא כאשר הוא נע במהירות ביחס אלינו.

ומעט על קירור. אם נרצה לקרר פחית משקה ביום חם, נוכל להכניסה לדלי מי קרח. דרך מקובלת לקירור בתנאי מעבדה היא באמצעות חנקן נוזלי, שטמפרטורת הרתיחה שלו היא 196°C - והוא קל לשימוש ואינו יקר. חומר שיבוא איתו במגע יתקרר לטמפרטורה זו. אבל זה לא מספיק קר לצרכינו. טמפרטורת החנקן פשוט אינה נמוכה דיה למחקר באטומים קרים. יתרה מזו, גם הטמפרטורה במקום הקר ביותר המוכר לנו בטבע, החלל החיצון, אינה נמוכה דיה. הטמפרטורה שם היא 270.45°C - , רק 2.7 מעלות מעל האפס המוחלט או, בשפת הפיזיקאים, 2.7 מעלות קלווין². אז כמה קר זה מספיק קר בשבילנו, חוקרי האטומים הקרים? ובכן, כדי להגיע לתופעות המעניינות (שנתאר בהמשך), האטומים צריכים להיות מקוררים לטמפרטורה קרה פי 10 מיליון מזו שבחלל! אין סביבה קרה כזו ביקום כולו, ומכאן הצורך בשיטה מיוחדת. פתרון הגיע מכיוון בלתי צפוי – לייזר.

2. סולם קלווין הוא סולם "הטמפרטורות המוחלטות". אפס קלווין (לערך 273.15°C -) הוא האפס המוחלט – הטמפרטורה שבה האטומים "נעצרים".

תרשים המערכת לקירור האטומים, הנמצאת בוואקום גבוה (10^{-11} טור <)



שלב שני - מלכודת מגנטו-אופטית

במרכז המערכת, מיד לאחר מאט-זימן, ממוקם תא זכוכית אשר בתוכו מתבצעים שלבי הקירור הבאים, ובהמשך – גם המחקר עצמו. חלק מהאטומים שעברו קירור ראשוני והגיעו אל תא הזכוכית נתפסים שם במלכודת, שבה ימשיך תהליך הקירור. זוהי מלכודת מגנטו-אופטית (Magneto-Optical Trap), המבוססת, כמו בשלב הקודם, על אפקטי דופלר וזימן. היא בנויה מקרני לייזר רחבות המגיעות משישה כיוונים שונים ומכוונות למרכז התא. שני סלילים, שדרכם זורם זרם חשמלי בכיוונים מנוגדים, ממוקמים משני צדי התא ומייצרים שדה מגנטי המתאפש

במרכז תא הזכוכית. תדר הלייזר מכויל כך שיהיה בתהודה עם אטומים הנעים לקראתו ומשקלל גם את ההיסט בתדר שגורם השדה המגנטי. כתוצאה מכך פועל על האטומים כוח המאט אותם (שוב, עקב בליעת הפוטונים). האטומים המקוררים מתרכזים באזור קטן שקוטרו מילימטרים אחדים במרכז התא, שם השדה המגנטי מתאפש והיעדרו של היסט זימן הופך אותם לכמעט "שקופים" ללייזר. האטומים עדיין בתנועה, אך הם סיימו את תהליך הקירור של שלב זה, שנמשך אלפיות שנייה אחדות. תפקידו העיקרי של הלייזר כעת הוא לשמור אותם שם. בחלקיקים הלכודים אפשר להבחין בעין בלתי מצוידת, כפי שאפשר



שאר הפוטונים יהיו חסרי תועלת מבחינתנו.

מאז שנת 1985, שבה דווח לראשונה על ניסוי מוצלח בקירור אטומים, פותחו שיטות רבות לקירור באמצעות לייזר. נתאר כאן שלושה שלבים של קירור שאותם עוברים האטומים במעבדתנו בדרך לטמפרטורה הסופית שלהם. שני השלבים הראשונים מבוססים על עקרון הבליעה והפליטה של פוטונים. גם בשלב השלישי והאחרון יש שימוש בלייזר, אם כי בצורה עקיפה. אנו משתמשים במעבדה במערך של שישה לייזרים בעלי הספקים ותדרים שונים.

שלב ראשון – קירור במאט-זימן

בחרנו לקרר את אטום הליתיום (${}^7\text{Li}$). זהו אטום קל (שלישי בטבלה המחזורית), מתכת מוצקה בטמפרטורת החדר. הליתיום הוא חומר פעיל מאוד מבחינה כימית, ולכן מן ההכרח להחזיקו בוואקום או בסביבת גזים ניטרליים (כגון ארגון). עם כל המגרעות, יש לליתיום תכונה אחת ההופכת את העבודה איתו למתגמלת ביותר. על תכונה זו נעמוד בהמשך. אנו זקוקים לליתיום במצב גזי על מנת לקררו; לשם כך אנו מחממים אותו. כן, זו לא טעות. הקירור מתחיל בחימום! מחממים את הליתיום לטמפרטורה של 4500°C , הרבה מעבר לטמפרטורת ההתכה שלו, על מנת לנדף חלק מהנוזל לגז בתוך חלל התנור. בטמפרטורה זו, מהירות האטומים הממוצעת היא כ-1.6 ק"מ לשנייה, בהחלט לא תנאי התחלה אידיאליים כשהמטרה היא להאט.

מערכת הקירור שלנו בנויה כצינור חלול ארוך וישר, שבקצהו האחד ממוקם התנור, ובחללה שורר ואקום גבוה מאוד (10^{-11} טור <). בתנאי לחץ נמוכים אלו, תנועת האטומים היא בליסטית (לאמור, הם נעים בקו ישר כל עוד אינם מתנגשים בקיר). התנור מחובר אל שאר חלקי המערכת בשני צמצמים. אטומים המצליחים לעבור דרך שניהם במעוף אחד יוצרים אלומת חלקיקים דקה, מעין שטף אטומים הנע מהתנור והלאה לאורך הצינור. מנגד לתנור, בקצה האחר של

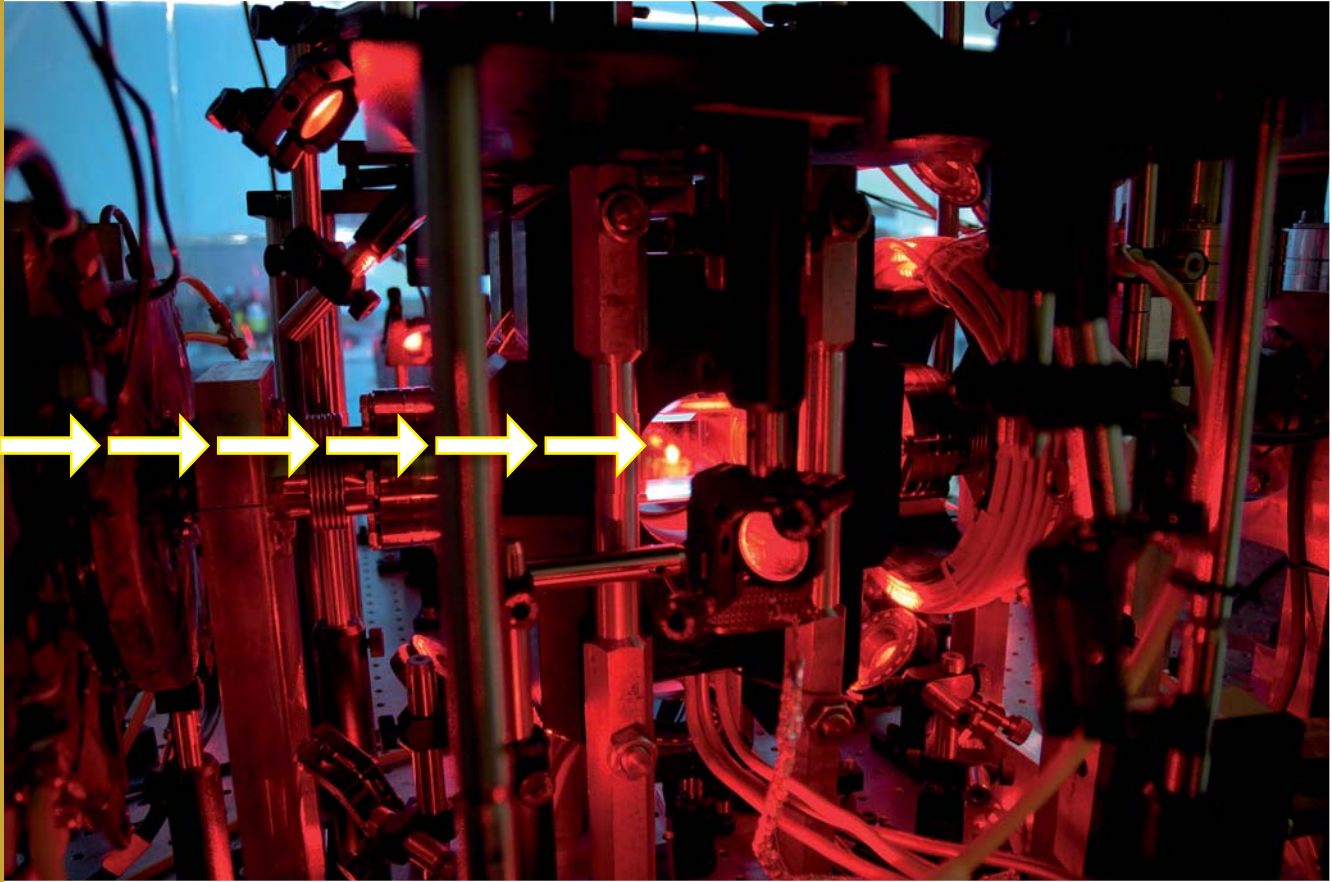
המערכת, ממוקם חלון שדרכו נכנסת אלומת לייזר חזקה הפוגשת חזיתית את אלומת האטומים. מהירות האטומים הפוכה לכיוון התקדמות האור, ולפיכך כל בליעה של פוטון באטום אמורה להאט אותו.

אך המציאות היא מעט מורכבת יותר. כזכור, פוטון ייבלע באטום רק אם הוא נמצא בתהודה איתו. באלומת האטומים שלנו החלקיקים נעים אמנם כולם באותו כיוון, אך בהתפלגות רחבה של מהירויות. לפיכך, כתוצאה מאפקט דופלר³, כל אטום "יראה" את הפוטונים בתדר שונה, התלוי במהירותו. אפשר לומר שתדר התהודה יהיה שונה בין אטומים בעלי מהירויות שונות. מכיוון שתדר אור הלייזר הוא בקירוב טוב חד-צבעי, רק אטומים במהירות מסוימת מאוד יצליחו לבלוע פוטונים ולהאט. יתרה מזו, ברגע שיאטו מעט, לא יהיו עוד בתהודה עם הפוטונים, כיוון שמהירותם השתנתה. ברור שאי-אפשר לבצע קירור יעיל בדרך זו.

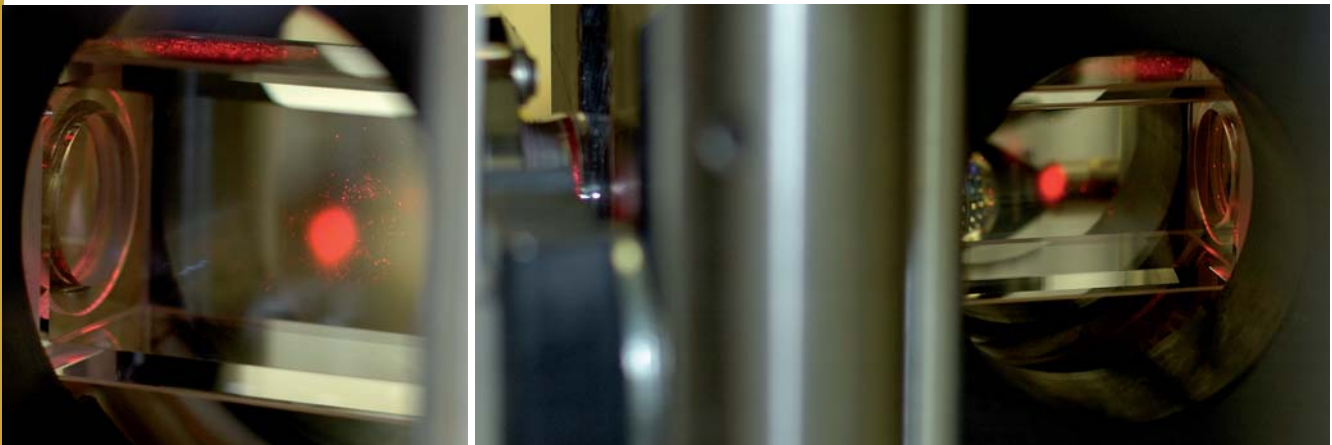
ואולם, למזלנו, לא רק המהירות משפיעה על תדר התהודה של האטומים. גם לשדה מגנטי יש לרוב השפעה דומה. אפקט זה נקרא אפקט זימן (על שם המדען ההולנדי פיטר זימן, Zeeman). תדר התהודה של האטום משתנה כפונקציה של חוזק השדה המגנטי שבו הוא נמצא. אפשר להשתמש באפקט זה לתועלתנו על-ידי כך שנפצה על היסט דופלר באמצעות היסט זימן. כיצד הדבר מתבצע בפועל? הזרמת זרם חשמלי בתיל מוליך המלוּפף סביב קטע באורך כ-30 ס"מ בצינור יוצרת שדה מגנטי, הגדל ככל שהאטומים מתרחקים מהתנור. חוזק השדה המשתנה בכל נקודה דואג להשאיר את האטומים בתהודה לאורך כל מסלול ההאטה. מבנה זה נקרא מאט-זימן (Zeeman-slower). כל אטום שיאט במסלול הקצר בן 30 הס"מ יבלע ויפלוט בסך-הכל כ-10,000 פוטונים. כתוצאה מכך יהיה נתון במשך זמן זה לכוח הגדול פי 100,000 מכוח המשיכה של כדור-הארץ, אשר יגרום לו להאט למהירות של כ-30 מטרים לשנייה בלבד.

3. אפקט דופלר – שינוי בתדירות של גל נצפה כשמקור הגלים נמצא בתנועה ביחס לצופה (או למאזין). לדוגמה – סירנת אמבולנס נשמעת בצליל בעל תדירות גבוהה יותר כאשר האמבולנס מתקרב מאשר כשהוא מתרחק.

ממחקרי אוניברסיטת בריאילן

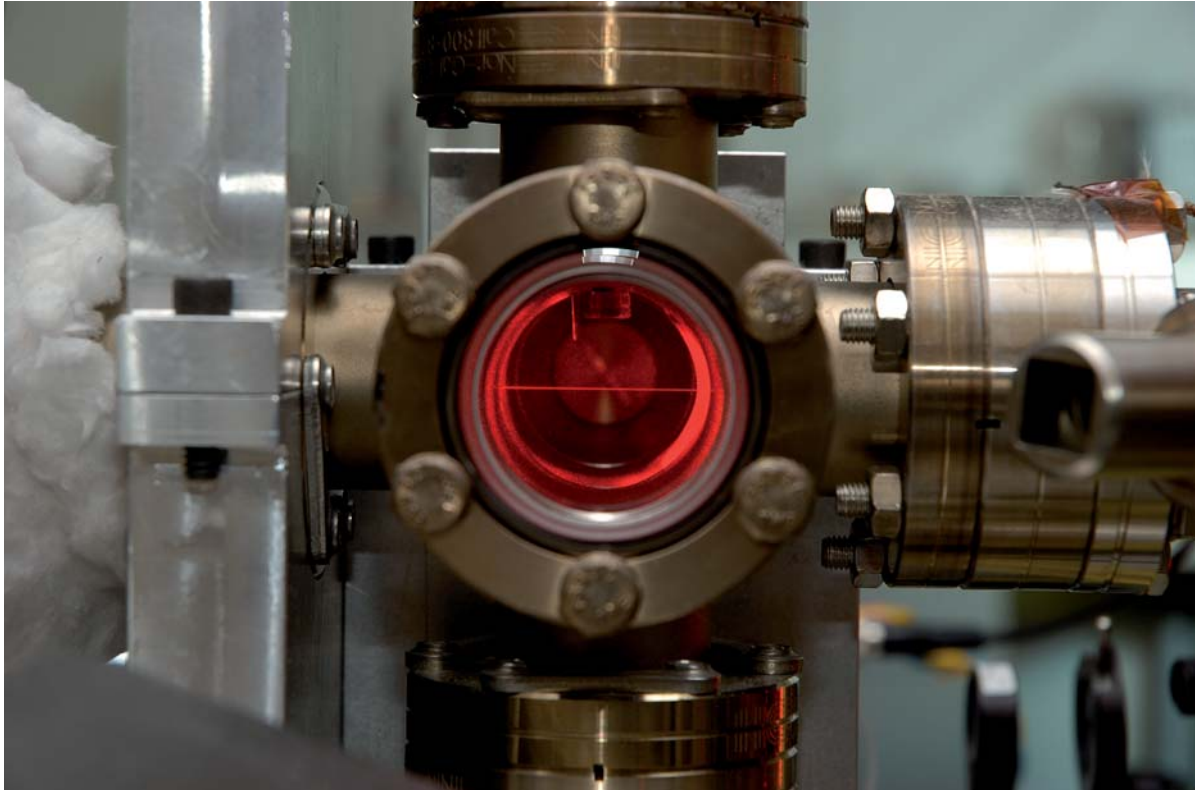


תמונה 3 המלכודת המגנטו-אופטית בפעולה. קרני הלייזר מגיעות משישה כיוונים שונים למרכז תא הזכוכית, אשר בתוכו אפשר להבחין באטומים הלכודים (נקודה אדומה בהירה)



תמונות 4-5 אטומי הליתיום המקוררים לכודים בתוך תא הזכוכית שבתוכו שורר ואקום





תמונה 2 בתמונה זו אפשר לראות את אלומת האטומים היוצאת מהתנור (משמאל) לכיוון מאט-זימן (מימין). האטומים נראים דרך חלון בגוף המערכת. הצבע האדום, שבזכותו אפשר להבחין בהם, מקווח בפיזור הפוטונים של הלייזר המאט המגיע מימין (צבע האור תלוי בסוג הלייזר)

פי 1,000 מטמפרטורה זו, ולכן שלב הקירור הבא מבוסס על שיטה אחרת. נקודה למחשבה: כולנו יודעים מה קורה לגז כשמקררים אותו – הוא מחליף מצב צבירה והופך לנוזל ואחר-כך למוצק. אם כן, מדוע האטומים הלכודים ממשיכים לשמור על מצב צבירה גזי על אף הטמפרטורה הנמוכה, שהרי אמרנו כבר כי בטמפרטורת החדר הליתיום הוא מוצק? ובכן, יש להביא בחשבון כי טמפרטורות ההתכה והרתיחה של כל חומר תלויות בצפיפותו. בתוך המלכודת, צפיפות האטומים קטנה פי מיליון מזו של האוויר בחדר, ולכן האטומים אינם משנים את מצב הצבירה שלהם.

← לראות בתמונות. הם נראים כמו ערפילית אדומה קטנה המרחפת במרכז התא. מצליחים לראותם בזכות הפוטונים המפוזרים על-ידי האטומים בתהליך הבליעה/פליטה (הלייזר הוא בתחום האור האדום). האטומים "תלויים" בתוך הוואקום, המונע מהם מגע עם כל גוף חם. בתמונות יש במלכודת כמיליארד אטומי ליתיום בטמפרטורה של 0.3mK (0.3 אלפיות קלווין), פי 10,000 קר יותר מהחלל החיצוני! זוהי טמפרטורה קרובה מאוד לגבול האפשרי בקירור של אטומי ליתיום המבוסס על בליעת פוטונים (הגבול נקרא Doppler limit), ובדרך הנוכחית אי-אפשר לקרר מעבר לה. אך הטמפרטורה שלה אנו שואפים קרה

יודעים היכן בדיוק. זוהי אי-הוודאות. הכדור יכול להימצא מבחינתנו בכל מקום בשטח המוסתר מתחת לכובע. עכשיו נניח כי ככל שמהירות הכדור אטית יותר – הכובע גדל (ואיתו גדלה גם אי-הוודאות). עם הנמכת הטמפרטורה, יגדלו הכובעים עד שבשלב מסוים כבר לא נראה את צבעו הירוק של השולחן, כיוון שהכובעים יחפפו בשטחם זה את זה. מהי הטמפרטורה הנמוכה ביותר שאליה אפשר להגיע? זו הטמפרטורה שבה הכובעים של הכדורים יהיו גדולים כמו השולחן עצמו. במצב זה כל אחד מהכדורים נמצא בסיכוי שווה בכל נקודה על פני השולחן. אין לנו עוד אפשרות להבחין בין כדור לכדור.

ובכן, מצב זה בדיוק חזו בוזה ואיינשטיין, והתופעה מכונה עיבוי בוזה-איינשטיין (Bose-Einstein condensation), או בקיצור BEC. שנים ניסו פיזיקאים לקבל BEC בגז אטומים אך לא הצליחו להגיע לטמפרטורות נמוכות מספיק. שיטת הקירור בנידוף היא שנתנה את הדחיפה האחרונה להשגת המטרה. ב-1995 התקבל לראשונה עיבוי בוזה-איינשטיין בשתי מעבדות שונות בארצות-הברית: באוניברסיטת קולורדו (עיבוי אטומי רובידיום) וב-MIT (עיבוי של אטומי נתרן). ב-2001 זכו מדענים בפרסי נובל על הישג זה.

BEC, ואטומים קרים בכלל, הם כלי חשוב מאוד בתחום המדידות המדויקות:

- שעונים אטומיים נסמכים על תדרי התהודה של אטומים כאלו ומגיעים לרמות דיוק מדהימות (טעות של פחות משנייה במשך מיליון שנים).
- ענף זה שיפר פלאים את יכולתנו למדוד קבועי טבע, ומחקרים היום עוסקים בשאלה, אם קבועים אלו הם אכן "קבועים", או שמא הם משתנים בזמן.
- רגישותם של האטומים הקרים לשינויים סביבתיים מאפשרת בניית גרביטומטרים – מכשירים המזהים שינויים קלים בשדה כוח המשיכה, שבעזרתם אפשר לחפש מתכות כבדות מתחת לאדמה.
- אטומים קרים מהווים פלטפורמה טובה לבניית מחשב קוונטי, אשר עשוי לספק יכולות חישוב חזקות לאין שיעור ביחס למחשב המוכר.

את הטמפרטורה בה ל- 0.3mK . המלכודת הנוספת מבוססת על לייזר בעל אורך גל 1.07 מיקרומטר. זהו לייזר בתחום האינפרא-אדום (IR), ותדר זה רחוק מאוד מתהודה עם האטומים. הלייזר חזק במיוחד ונותן הספק של 100W . לייזר זה ממלא תפקיד חשוב מאוד במערכת.

אנו ממקדים את קרן הלייזר למרכז המלכודת המגנטו-אופטית, שבה נמצאים אטומי הליתיום המקוררים מסוף השלב הקודם. לאטומים, בתנאים מסוימים המתקיימים כאן, יש משיכה לאזור שבו עוצמת הלייזר היא מרבית (Stark effect) (העוצמה מוגדרת כהספק ליחידת שטח). אזור זה, שקוטרו כ- 30 מיקרומטר, מתקבל במוקד הקרן. וכך, לאחר כיבוי הלייזרים האחראים על המלכודת המגנטו-אופטית, נותרים כמיליון אטומים לכודים במלכודת החדשה, הנמצאת במוקד קרן הלייזר החזקה. כעת מאפשרים לאטומים המהירים בחבורה הלכודה לברוח מהמלכודת וכך להוריד את הטמפרטורה של החלקיקים שנותרו בה. הדבר נעשה על-ידי הקטנת הספק הלייזר, פעולה המקבילה להנמכת שפת שולחן הבייליארד במודל. במשך שניות אחדות מוקטן הספק הלייזר הדרגתית עד לקבלת הטמפרטורה הרצויה, כ- 300 ננו-קלווין!

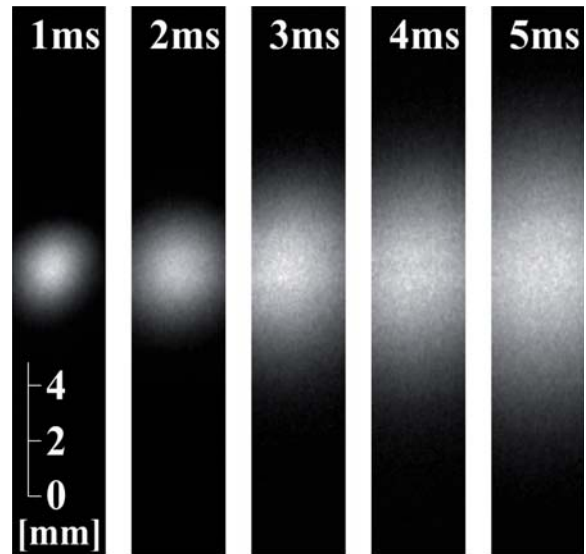
טמפרטורה אפס ועיבוי בוזה-איינשטיין

האם אפשר לקרר את האטומים עד לטמפרטורה של אפס קלווין – הטמפרטורה שבה החלקיקים עומדים מתנועה? ובכן, לפי מכניקת הקוונטים ועקרון אי-הוודאות של הייזנברג, האטומים אינם יכולים לעצור במקומם. לפי עיקרון זה, כאשר האטום מאט את מהירותו, גדלה אי-הוודאות לגבי מיקומו. בעצירה מוחלטת, אי-ודאות זו תגדל לאינסוף. זהו מצב בלתי אפשרי, שבו האטום יכול להימצא בכל מקום ביקום (ואף מעבר לו) בסיכוי שווה. אף על פי כן, דברים מעניינים מאוד קורים כשמתקרבים מספיק לאפס המוחלט.

ננסה להבין את משמעותה של אי-ודאות זו. נשתמש שוב במודל שולחן הבייליארד. תארו לכם כי כל כדור על השולחן נע כאשר הוא מוסתר מתחת לכובע רחב שוליים הנע איתו. אנו יודעים כי מתחת לכל כובע מסתתר כדור, אך איננו

**איך מודדים חום לאטום?**

בטרם נמשיך, ראוי לתת את הדעת לשאלה כיצד נעשית מדידת הטמפרטורה, שהרי את טמפרטורת האטומים המקוריים אי-אפשר למדוד בדרך המוכרת של מגע עם מדחום. כיצד, אם כן, מתבצעת המדידה? דרך אחת שבה אנו משתמשים היא לכבות באופן פתאומי את המלכודת המחזיקה את האטומים, להמתין פרק זמן מסוים ואז לצלם את האטומים במצלמה מהירה. על סמך התבוננות בסדרת תמונות כאלה, שצולמו בפרקי זמן קצובים, אפשר למדוד את מהירות התפשטות הענן האטומי מיד לאחר שחרורו. מהירות זו היא מהירות האטומים, וממנה אפשר להסיק בעזרת נוסחאות פשוטות מהי הטמפרטורה. דוגמה לסדרת תצלומים כזו אפשר לראות בתמונה 6.



תמונה 6 התפשטות ענן האטומים עם שחרור מהמלכודת. טמפרטורת האטומים בתצלום היא כ- 0.3mK (0.3 אלפיות קלווין) והיא מחושבת לפי מדידת מהירות ההתפשטות

שלב שלישי – קירור על-ידי נידוף

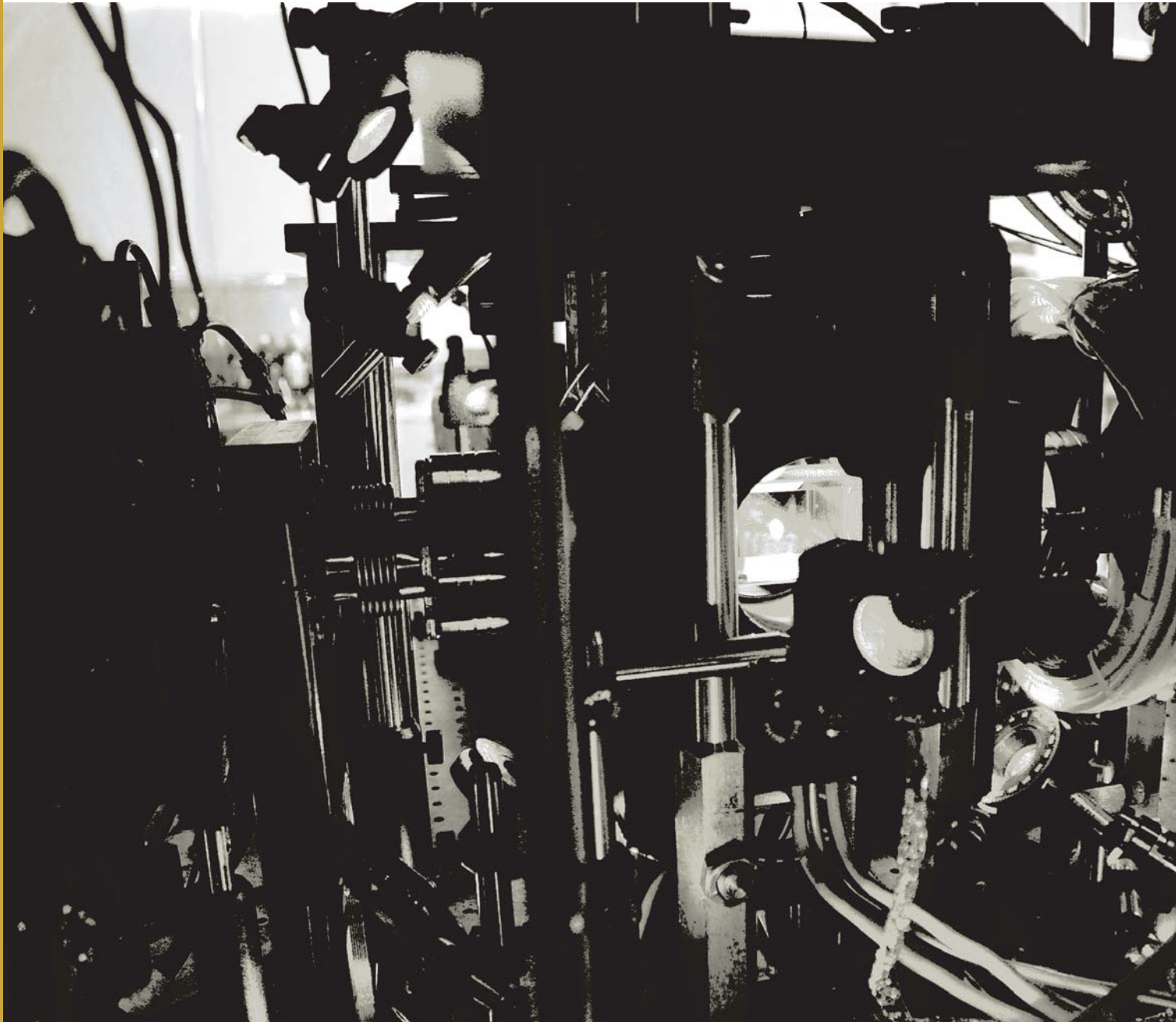
גוף האדם חייב לשמור על טמפרטורה של כ- 37°C על מנת לשרוד. הטמפרטורות באילת בקיץ נוסקות לעתים עד מעבר ל- 40°C , אך אינן מונעות את התיירים מלרבוץ לחוף הים. מהו אם כן המנגנון המונע מהם להתחמם? ואיך זה קשור לאטומים במעבדתנו?

כאמור, בשני השלבים הראשונים מיצינו את יכולת הקירור של הלייזר. טמפרטורת אטומי הליתיום נעצרה ב- 0.3mK . השלב הבא בקירור מבוסס על שיטה אחרת, המוכרת לכולנו מחיי היוםיום. זו גם השיטה שבה כל אחד מאיתנו שומר על טמפרטורת גופו ביום חם – הזעה. כדי להבין איך מנגנון זה עובד, נחזור למודל שולחן הביליארד. כזכור, הכדורים נעים במישור השולחן במהירויות שונות ומתנגשים זה בזה. אם נסתכל על התפלגות המהירויות, נגלה כי רוב הכדורים נעים במהירות הקרובה למהירות הממוצעת, ואילו מספר מועט יחסית של כדורים נעים במהירויות גבוהות או נמוכות במיוחד. כעת, מה יקרה אם ננמיך את שפת השולחן כך שהכדורים המהירים ביותר יצליחו ליפול ממנו ולא לחזור? האם תשתנה טמפרטורת השולחן?

ובכן, הטמפרטורה היא יחסית לאנרגיה הממוצעת של הכדורים, וזו יחסית למהירותם בריבוע. לפיכך, אמנם סולקו מהשולחן כדורים מועטים בלבד, אך עקב מהירותם הגבוהה, החזיקו הכדורים שאבדו באנרגיה כוללת גדולה. התוצאה – האנרגיה הממוצעת של הכדורים שנשארו על השולחן נעשתה נמוכה יותר ולכן הטמפרטורה שלהם קטנה (חשיבות רבה יש לעובדה, שהכדורים מתנגשים זה בזה ומחליפים אנרגיה עקב כך, אך לא נדון בנקודה זו במסגרת המאמר). כך גם אנו מתקררים. דרך בלוטות ההזעה שבעורנו מופרשים נוזלים. חלק ממולקולות המים, אלו בעלות האנרגיה הגבוהה מן הממוצע בגופנו, מצליחות להתנדף, בדיוק כמו הכדורים המהירים במודל, ועקב כך יורדת טמפרטורת הגוף. דבר דומה קורה כאשר אנו נושפים על פני מרק חם. אנו מאיצים את נידוף החלקיקים המהירים וכך מקררים את הנוזל.

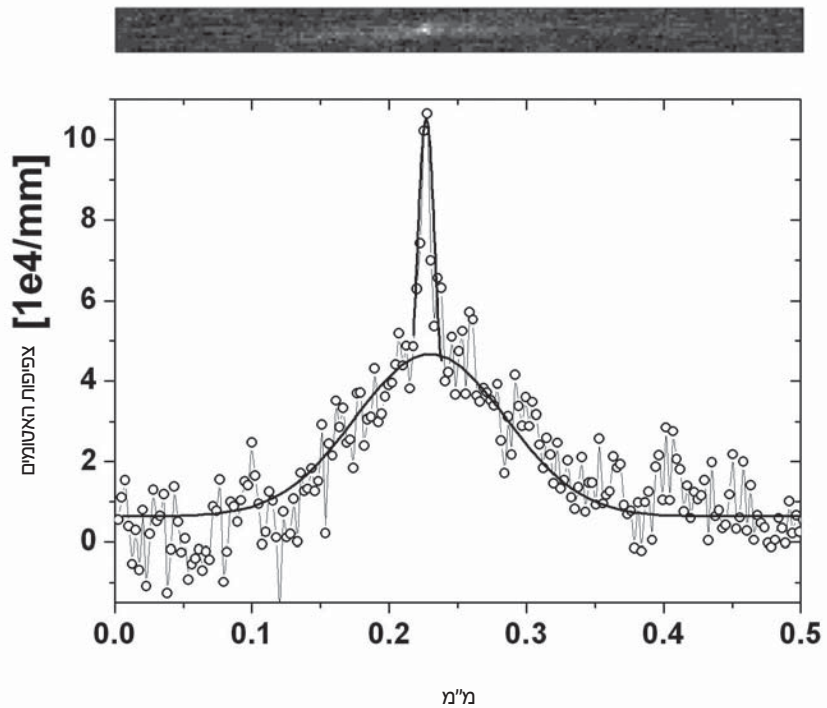
כדי ליישם שיטה זו, קירור על-ידי נידוף, על אטומי הליתיום, יש להחליף את המלכודת שבה הם מוחזקים. כזכור, המלכודת המגנטו-אופטית מסתמכת על פוטונים בתהודה אשר הגבילו

ממחקרי אוניברסיטת בריאילן



065

גליליאו
אוקטובר
2008



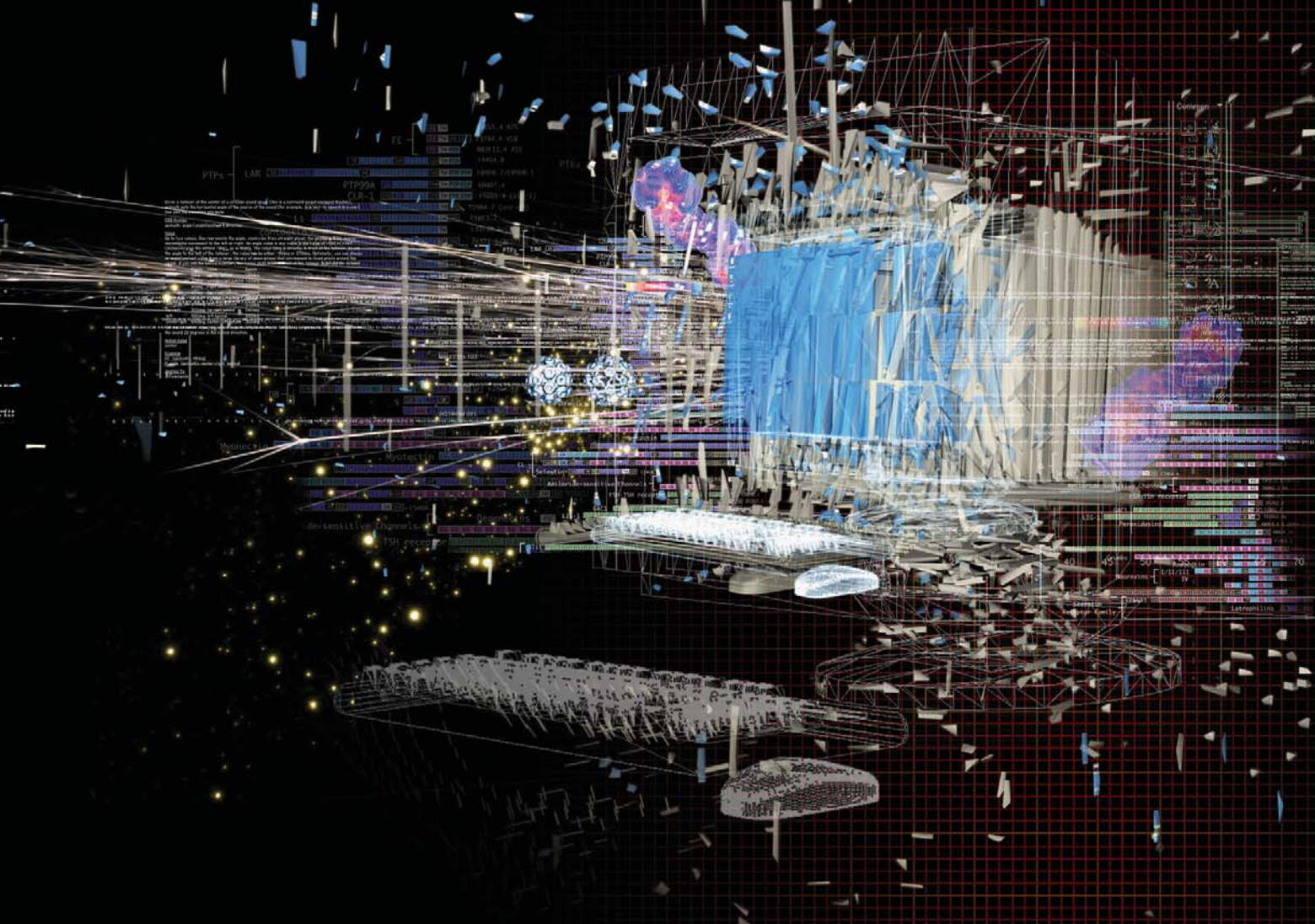
תמונה 7 עיבוי בוז-איינשטיין (BEC) של אטומי ליתיום כפי שהושג במעבדתנו. התמונה העליונה: במרכז נמצאים האטומים המעובים, כאלף מספרם (נקודה בהירה). מסביבם אטומים שלא התעבו בטמפרטורה של כמה מאות ננו-קלווין (ננו = מיליארדית). הגרף: זהו ניתוח של התמונה, המתאר את צפיפות האטומים האורכית (הציר האנכי) כפונקציה של המיקום במלכודת (הציר האופקי). האטומים המעובים מוחזים ב"חנית" הממוקמת מעל ה"גבעה" של האטומים שאינם מעובים

סוליטונים

אבן שנוזקה לתוך אגם שקט תייצר גל אשר יאבד מגובהו תוך כדי תנועתו ו"יימרח" עד שייעלם. תופעה זו נגרמת כתוצאה מדיספרסיה (פיזור) של הגל על-ידי התווך שבו הוא נע. בניגוד לכך, הסוליטונים הם גלים השומרים על גודלם וצורתם תוך כדי התקדמות. במקרה של BEC, אפקטים של משיכה בין החלקיקים המרכיבים את הגל מפצים על הפיזור שלו. נבחן את הדוגמה הזאת: אם ניקח חופן כדוריות קטנות בידנו ונגלגל אותן על הרצפה, הן יתחילו לנוע כמקשה אחת, אך אט-אט יתפזרו ויתרחקו זו מזו. לעומת זאת, אם נגלגל

מבחינתנו, הפיזיקאים, ה-BEC הוא בעיקר מגרש משחקים ענקי, שבו תופעות קוונטיות ניתנות לצפייה ישירה. קחו לדוגמה את תופעת ההתאבכות. כבר התרגלנו (אולי) לעובדה שאור הוא בה-בעת חלקיק וגל, אך לפי מכניקת הקוונטים, גם החומר הוא גל. כן, לכל אטום יש גם תכונות גליות. ואכן, התאבכות בין שני BEC זהים כבר נצפתה בניסויים.

בשנה האחרונה הצליחה קבוצתנו להגיע ל-BEC באטומי ליתיום. חומר זה מהווה את התשתית למחקרנו בתחום גלי החומר, כפי שנתאר בהמשך.



עד היום

ניתן למצוא לא מעט מחשבים שגודלם כגודלו של ארון. מחשבים אלו מצויים בעיקר במעבדות מחקר הנעזרות בחישובים מסובכים

חולמים

תוכנה ורשת • גאדג'טים • משחקים • מדריכים • חדשות המחשב

ifeel
www.ifeel.co.il

לקריאה נוספת:

אתר אוניברסיטת קולורדו, המספר בצורה מהנה על עיבוי בוז-איינשטיין:
[/http://www.colorado.edu/physics/2000/bec](http://www.colorado.edu/physics/2000/bec)

Nobel Prize Lectures 1997:
http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1997

Nobel Prize Lectures 2001:
http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2001

N. Gross and L. Khaykovich, "All optical production of Li-7 Bose-Einstein Condensation using Feshbach resonances", *Physical Review A* 77, 023604 (2008).



← אותן כדוריות על יריעת ניילון דקה, משקלן ייצור בה שקע קטן, שיתקדם איתן וימנע מהן להתפזר. אפקט דומה אנו מבקשים לחקור אצלנו במעבדה. את הכדוריות מחליפים האטומים המקוררים. כזכור, אטומי הליתיום אינם נוחים לעבודה, אך יש להם תכונה אחת המפצה על כל הקשיים: אטומים אלו מאפשרים שליטה יוצאת מגדר הרגיל בעוצמת המשיכה ביניהם, המשיכה שהופכת גל חומר לסוליטון. לכן הליתיום הוא מועמד מצוין למחקר בתחום זה. סוליטונים הם תופעה מעניינת מאוד למחקר, עקב שכחותם במערכות שונות בטבע כגון נוזלים, אופטיקה לא-ליניארית, ביולוגיה מולקולרית ואסטרופיזיקה. באופטיקה משמשים סוליטונים של אור להעברת מידע למרחקים ארוכים בתוך סיבים אופטיים. בתחום האטומים הקרים, סוליטונים צפויים לשפר אף יותר את היכולת לבצע מדידות מדויקות בזכות יכולתם לשמור על צורתם.

עתידי האטומים הקרים

נוכחנו בעניין הרב שמעורר תחום האטומים הקרים. בעשור האחרון פורסמו עבודות מחקר רבות מאוד בתחום זה, הנמצא כיום בחזית המדע ומעסיק פיזיקאים בכל העולם. מאמצים רבים מוקדשים היום למיניאטוריזציה של מערכות קירור אטומים (atom chips), על מנת שיוכלו לשמש במכשירים ניידים המיועדים לביצוע מדידות מדויקות בשטח. BEC הוא כלי ייחודי לחיקוי מודלים מורכבים של פיזיקת המצב-המוצק, אינפורמציה קוונטית (quantum information), פיזיקה לא-ליניארית ועוד. ענף זה ממשיך להתפתח, וצופן בחובו עוד תגליות רבות. ■

לב חייקוביץ הוא ד"ר לפיזיקה ומרצה בכיר באוניברסיטת בר-אילן.

נועם גרוס הוא סטודנט לתואר שלישי באוניברסיטת בר-אילן ונתמך על-ידי תכנית מלגות אדאמס של האקדמיה הלאומית הישראלית למדעים.



היתה באוניברסיטה אף לא אשה אחת בדרגה של פרופסור מלא. בדרגת פרופסור-חבר היו צ'רנה רייס בבוטניקה, חנה רוזין בפתולוגיה ואלישבע גולדשמידט בזואולוגיה). בשנת 1991, בהיותה בת 91, קיבלה נעמי פיינברון את פרס ישראל על תרומתה הייחודית לחקר ארץ ישראל. היא נפטרה ב-1995 בגיל 95.

הגנטיקאית **אלישבע גולדשמידט** ייסדה את החוג לגנטיקה באוניברסיטה העברית ועמדה בראשו. גולדשמידט נולדה בגרמניה, בפרנקפורט שעל המיין, כאלוזבת וקסלר, ולמדה רפואה באוניברסיטת פרנקפורט. ואולם, לאחר שנת לימודים אחת, עם עליית הנאצים לשלטון ב-1933, נאלצה לעזוב את אוניברסיטת פרנקפורט. היא התקבלה לאוניברסיטת לונדון, אך לא ניתנה לה האפשרות להמשיך בלימודי הרפואה, ובלית ברירה עברה ללימודי זואולוגיה וסיימה בלונדון תואר ראשון בהצטיינות. ב-1936 נישאה ליוסף גולדשמידט ועלתה ארצה.



אלישבע גולדשמידט במעבדה. החוקרת-האשה השלישית באוניברסיטה העברית שמונתה לדרגת פרופסור-חבר

מאמר זה יעסוק בסיפוריהן של שלוש מהמדעניות הראשונות שפעלו בישראל. חוקרות אלו היו מהנשים הספורות שהצליחו להשתלב במחקר מדעי ובאקדמיה בתקופה שבה נשים בעלות קריירה מדעית היו מיעוט קטן, בארץ ובעולם. כל השלוש פעלו בתחומי הביולוגיה והרפואה, תחומים שמשיכתן של נשים אליהם היא תופעה מוכרת. כמו כן ידוע, כי נשים נוטות לפנות לתחומי המדע הפריפריאליים, החדשים, וכפי שנראה, שתיים מבין השלוש, גולדשמידט ורמות, אכן בחרו באפיקים שלא היו מפותחים בארץ. כך יצרו לעצמן שתייהן נישא משל עצמן, והפכו לאמהות-המייסדות של הגנטיקה ושל ההמטולוגיה בארץ.

נעמי פיינברון-דותן חקרה את צמחיית הארץ במשך למעלה משישים שנה, ופרסמה עשרות מאמרים וכמה מגדירי צמחים. היא נולדה למשפחה ציונית במוסקווה, למדה באוניברסיטת מוסקווה ועברה לאוניברסיטה של רומניה בטרנסילבניה. שם קיבלה תואר ראשון בבוטניקה ב-1923. ב-1924 עלתה עם הוריה ואחיה ועבדה כמורה בתל-עדשים שבצמח יזרעאל. בסיוור להר התבור שנערך למורים לטבע בשנת 1925, פגשה באדם ששינה את חייה – הבוטנאי אלכסנדר איג, שהדריך את הסיור. איג עורר בה את ההתלהבות ואת השאיפה להפוך לחוקרת, ונותר עמית קרוב שלה עד מותו ב-1938. נעמי פיינברון לא נישאה מעולם, ואת השם "דותן" צירפה לשם פיינברון כאשר אָחיה עברתו את שם המשפחה לדותן.

בעקבות המפגש עם איג הצטרפה פיינברון לעבודה בתחנה לחקר החקלאות בתל-אביב, שהפכה לחלק מהאוניברסיטה העברית לאחר הקמתה ב-1925. היא כתבה את עבודת הדוקטורט שלה על הסוג זמזומית (ממשפחת השושניים), בהנחיית איג, וסיימה אותה ב-1938. במחקריה הציטוטקסונומיים עשתה פיינברון שימוש במספר הכרומוזומים ובצורתם כאחד הסמנים למיון.

רק ב-1952 קודמה פיינברון לדרגת מרצה באוניברסיטה. ב-1960 קיבלה דרגת פרופסור-חבר, והיתה לאשה הרביעית שקיבלה דרגה זו באוניברסיטה העברית. (באותה שנה לא



נורית קירש

תצלום: אימג'בנק / Gettyimages

מבחנות ומבחנים

קשייהן והתמודדותן של שלוש מדעניות חלוצות בישראל



סטריאוטיפים מגדריים

גם התפישה החברתית של האשה כלא-שייכת לאקדמיה משתקפת בביוגרפיה של גולדשמידט ושל רמות.

כישלון המאמצים ליצור מחלקה עצמאית לגנטיקה באוניברסיטה העברית, ולא להסתפק בחוג לימודים, היה מקור תסכולים לגולדשמידט. גולדשמידט פנתה לרקטור בעניין זה בראשית 1963. בפרוטוקול של הוועדה המתמדת נכתב: "אם יימצא מועמד מתאים רצוי היה להקים מחלקה לגנטיקה...". גולדשמידט, כפי הנראה, לא נתפשה כמועמדת מתאימה. מדובר היה בגנטיקאית שהיתה בדרגת פרופסור-חבר, פרסמה עשרות מאמרים שצוטטו על-ידי עמיתים בארץ ובעולם, מדענית שבמובנים רבים היתה חלוצת הגנטיקה בישראל: היו"ר הראשונה של החוג לגנטיקה באוניברסיטה העברית, היו"ר הראשונה של החברה לגנטיקה בישראל ומחברת הערך "גנטיקה" באנציקלופדיה העברית. אף על פי כן, מסתבר שלא נתפשה כמועמדת מתאימה לעמוד בראש מחלקה באוניברסיטה העברית.

כפי שצינתי קודם, רמות, שסיימה את לימודי הרפואה בהצטיינות, קיבלה המלצה מוועדת הקבלה לפקולטה להישאר אחות ולוותר על לימודי הרפואה. אני יכולה רק לשער, שאף אחד מהגברים שהגיעו לריאיון לא קיבל הצעה דומה.

תפישה עצמית

נעמי פיינברון ראתה את עצמה תמיד קודם כל כחלק מצוות מחקר שכלל אותה, את אלכסנדר איג ואת מיכאל זהרי. זאת בשונה מעמיתיה הגברים, שהדגישו יותר את הישגיהם האישיים. גם כשהיתה בגמלאות ורואינה לספרה של רבקה אשבל¹, דיברה פיינברון בעיקר על עמיתה, והדגישה את ההישגים המשותפים יותר מאשר את הישגיה האישיים. לגישה זו יש כמובן יתרונות רבים, אך ספק אם היא יעילה לצורך התקדמות באקדמיה.

רמות נמנתה עם מייסדי הפקולטה לרפואה באוניברסיטת תל-אביב, ולימדה בה מאז 1966. היא קיבלה דרגת פרופסור-חבר ב-1966 ופרופסור מלא ב-1971. ב-2001 זכתה רמות בפרס ישראל במדעי הרפואה.

קשיים

בניתוח הקשיים ודרכי ההתמודדות של המדעניות, אתבסס על המודל התיאורטי שהציעה נינה טורן (Toren) בספרה *Hurdles in the Halls of Science*. טורן תיארה את המסלול של נשות אקדמיה בישראל כמסלול מכשולים, שבו המשוכות מצויות לא רק בנקודת ההתחלה או בסוף המסלול, בדמות תקרת זכוכית, אלא לכל אורכה של הדרך. אפשר להצביע על שלושה קשיים מרכזיים שבפניהם עמדו פיינברון, גולדשמידט ורמות.

הניידות המוגבלת של נשים

כאשר עמיתיה הגברים של גולדשמידט נסעו להשתלם מעבר לים, נלוו אליהם תמיד, או כמעט תמיד, נשותיהם. גולדשמידט, לעומתם, דחתה את הנסיעה עד לאחר הלידה והגידול של בתה הצעירה. היא נסעה בגפה, ולולא הסיוע של אמה, ייתכן שהיתה מוותרת על הנסיעה ב-1950, ומחמיצה בכך את הסיכוי שלה לקריירה מדעית בעלת משמעות. מלבד בנסיעה הראשונה, בשאר הפעמים נסעה גולדשמידט לחודשים אחדים בלבד, אף פעם לא לשנה שלמה. יחד עם זאת, מכל נסיעה הצליחה להפיק את המקסימום, ולשלב השתלמות במעבדות של עמיתים ידועי שם יחד עם השתתפות בכנסים בינלאומיים.

מעבר לכך, יש שהניידות של אשה מוכתבת על-ידי בחירותיו של בן-זוגה. גולדשמידט עזבה את לונדון והגיעה לירושלים בעקבות בעלה, ורמות הצטרפה לבעלה להתמחות שלו בשיקגו. בשני המקרים הן הצליחו, בסופו של דבר, לנצל לטובתן את המעבר הכפוי, וזה היה אולי חלק מסוד הצלחתן.

1. אשבל, ר. (1991), כי מציון תצא תורה – תולדותיהם ותרומתם של מדעני האוניברסיטה העברית בירושלים במשך שישים ושש שנה (1925-1991), הוצאת קסט.





בארבע השנים שלאחר מכן (פיינברון, כפי שכבר הזכרנו, ואביבה צוקרמן בפרזיטולוגיה – במדעי הרוח והחברה טרם מונו נשים לדרגת פרופסור-חבר באותה עת) לא היו בעלות משפחה – גולדשמידט היתה היחידה מבין החמש שהיתה נשואה ואם לילדים. השילוב בין קריירה מדעית ומשפחה היה אפשרי, אך גבה מחיר: עייפות, תסכול ורגשות אשם. יחד עם זאת, יש לזכור שגולדשמידט אהבה מאוד את המחקר ואת ההוראה באוניברסיטה, וזכתה מהם לסיפוק רב.

ברכה רמות נולדה בקובנו שבליטא, למשפחת שוידן. היא עלתה ארצה ב-1947 באניית המעפילים תיאודור הרצל, שנתפסה על-ידי הבריטים, ונאלצה לשהות חודשים אחדים במחנה המעצר בקפריסין. כשהורשתה להיכנס לארץ ישראל, הצטרפה לקיבוץ להבות הבשן.

ברוסיה הוכשרה רמות כפלשר (feldsher) – מעין דרגת ביניים בין אחות לרופא, ועל כן שימשה כאחות הקיבוץ. כשפרצה מלחמת העצמאות, עברה לעבוד כאחות בית-החולים בצפת, ואחר-כך הצטרפה לחטיבת יפתח של הפלמ"ח וטיפלה בפצועים בצפון הנגב. חיים שיבא וברוך פדה, שפגשו בה במהלך המלחמה, עודדו אותה להירשם ללימודי רפואה בפקולטה שנפתחה באוניברסיטה העברית במאי 1949. במהלך ריאיון הקבלה ניסה אחד מחברי הוועדה לשכנע אותה, שהמדינה הצעירה זקוקה לאחיות יותר משהיא זקוקה לרופאים, ושהיא תוכל להועיל יותר כאחות. רמות נרשמה בכל זאת ללימודי הרפואה, נישאה במהלך לימודיה לסטודנט לרפואה שלמד איתה, יהושע רמות, וסיימה את לימודיה בהצטיינות.

מכיוון שבעלה של רמות רצה להתמחות בפסיכיאטריה, הצטרפה היא אליו להתמחות שלו בשיקגו. שם מצאה מקום התמחות בתחום ההמטולוגיה, העוסק בתאי הדם ובאיברים וברקמות המייצרים אותם, וכן בקרישת הדם, תחום שלא היה מוכר דיו בארץ באותה עת. כשחזרה ב-1957 לתל-השומר, בהיותה בת 32 בלבד, ייסדה את המכון ההמטולוגי ושימשה כמנהלת שלו עד לפרישתה לגמלאות ב-1991. כהמטולוגית, התמסרה לחקר גורמים סביבתיים וגנטיים המשפיעים על לויקמיה (סרטן של תאי הדם) ולימפומות (גידולים ממאירים של מערכת הלימפה).

גולדשמידט החלה בלימודי הדוקטורט באוניברסיטה העברית, בהנחייתו של גיאורג האס. במסגרת הדוקטורט בחנה גולדשמידט קריוטיפים (קריוטיפ הוא תמונת כלל הכרומוזומים בתא, שבה אפשר להבחין במספר הכרומוזומים, באורכם, בצורתם וכן בדגם פסים אופייני לאורכם) של יתושים ממשפחת הימשושיים (Chironomidae), שנאספו בא"י. ביתושים אלו, בדומה לזבובי הדרוזופילה, יש כרומוזומי ענק בבלוטות הרוק. גולדשמידט סיימה את הדוקטורט שלה ב-1942, אך רק ב-1949 קיבלה דרגת מדרין, שאפשרה לה חופש אקדמי בהוראה.

במהלך מלחמת העצמאות, עם ניתוקה של האוניברסיטה מהעיר, העבירה גולדשמידט את הפעילות המחקרית אל תוך ביתה. לאחר נפילתו של הסטודנט שלה טוביה קושניר במחלקת הל"ה, המשכיכה אלמנתו הצעירה, אביבה, את העבודה המיקרוסקופית של מחקריו בביתה של גולדשמידט, ושהתה בו שעות רבות. המעבר למחקר מדעי בתוך הבית נעשה על רקע המלחמה המתחוללת בחוץ, אך יש בו מן החזרה של העשייה המדעית מהמתחם הציבורי, המזוהה עם הדימוי הגברי, למתחם הביתי, המזוהה עם הדימוי הנשי.

בשנת 1950-1951 קיבלה גולדשמידט מלגה מהאגודה האמריקנית לנשות אקדמיה (American Association of University Women, AAUW), שאפשרה לה לנסוע להשתלמות של שנה בארצות-הברית. היא חששה מהפרדה מילדיה, שהיו אז בני 12 ו-3, אך בעלה עודד אותה לנסוע. מה שהקל את ההחלטה הסופית היה העובדה שאמה לקחה על עצמה את הטיפול בילדים במשך אותה שנה. גולדשמידט שהתה חצי שנה במעבדתו של החוקר הנודע תיאודוסיוס דובז'נסקי (Dobzhansky) בקולומביה וחצי שנה במעבדתו של קורט שטרן (Stern) בברקלי, שניהם מהגנטיקאים המובילים בעולם. היכרותה של גולדשמידט עם זבובי הדרוזופילה החלה בזכות העבודה עם דובז'נסקי, ובעקבות היכרות עם שטרן החלה לחקור גם גנטיקה של אוכלוסיות אדם.

ב-1954 קודמה גולדשמידט לדרגת מרצה ושלוש שנים אחר-כך, בדצמבר 1957, לפרופסור-חבר. הן שתי החוקרות שמונו לפנייה לדרגת פרופסור-חבר, והן השתיים שמונו



מאז עלה אחוז החוקרות באוניברסיטאות ובמוסדות מחקר אחרים, אך הוא עדיין נותר נמוך למדי. אני סבורה שסיפוריהן של שלוש המדעניות שהצגתי מייצגים במידה רבה סיפורים דומים של אותו קומץ של נשים שהצליחו לבסס קריירה מדעית מצליחה בישראל בשנות הארבעים, החמישים והשישים. יתר על כן, אני חושבת שמתוך הדברים אפשר גם לשער מה עצר את הנשים האחרות שהתחילו לפסוע באותה דרך, ונעצרו בשלב זה או אחר. ■

ד"ר נורית קירש מלמדת באוניברסיטת בר-אילן בתכנית הבין-תחומית למדע, טכנולוגיה וחברה ובתכנית להכשרת מורים.

לקריאה נוספת:

Fox-Keller, E. (1983) *A feeling for the Organism*, New York: Freeman.

Abir-Am P. and Outram D. Eds. (1989) *Uneasy Careers and Intimate Lives – Women in Science 1789-1979*, New Brunswick: Rutgers University Press.

Maddox, B. (2003) *Rosalind Franklin – The Dark Lady of DNA*, London: HarperCollins.

Toren, N. (2000) *Hurdles in the Halls of Science: the Israeli Case*, Lanham.

Kirsh, N. (2004) "Geneticist Elisabeth Goldschmidt: A Twofold Pioneering Story", *Israel Studies "Science in Israel – a special Issue"*, 9(02): 71-105.

Kirsh, N. (2006) "Bracha Ramot" and "Naomi Feinbrun-Dothan", entris in *Jewish Women – A Comprehensive Historical Encyclopedia*, Jerusalem: Shalvi.



ממסדי מסביר, על פי מירון, את הצלחתן של רחל, אלישבע, אסתר ראב ויוכבד בת-מרים לזכות בהכרה בתוך שנתיים בלבד (1920-1922).²

הפיכת החסרונות ליתרונות באופן כללי אפשר לומר, שמה שהפך את סיפורן של שלוש המדעניות לסיפור הצלחה היה היכולת שלהן להפוך חיסרון ליתרון. כאשר נאלצו לנסוע לארץ אחרת, הצליחו למצוא דרך להתקדם דווקא בסיטואציה החדשה. אם הן בודדו במידה מסוימת מהרשת החברתית-מקצועית המקומית מסיבות מגדריות או בשל גודלה המוגבל של הקהילה המדעית בארץ, הן השכילו ליצור קשרים עם מדענים מובילים מחוץ לישראל. לסיכום, בתקופתן פיינברון, גולדשמידט ורמות, נשים מדעניות היו מיעוט קטן ביותר. בעשרות השנים שחלפו

2. מירון, ד. (1991), אמהות מייסדות, אחיות חורגות – על שתי התחלות בשירה הארצישראלית המודרנית, תל-אביב, הקיבוץ המאוחד. אני מודה לגילי גופר על שהאירה את עיניי בעניין זה.



ואולם, הדוגמה הטובה ביותר היא הקריירה של גולדשמידט, שפרחה בשנים שבהן חלו שינויים במיקום האוניברסיטה ובמספר הסטודנטים הלומדים בה. עם ההתייבבות במספר הסטודנטים והתמקמות הקמפוס בגבעת רם, נעצרה התקדמותה האקדמית.

ראשית שנות המדינה היתה תקופה טובה עבור גולדשמידט. מספר הסטודנטים בפקולטות הוותיקות גדל מאוד, ובד בבד נפתחו פקולטות חדשות וכן מחלקות וחוגי לימוד חדשים בפקולטות קיימות. גם ההתנתקות מהר הצופים ופיזור הקמפוס ברחבי העיר, בצד הנזקים והקשיים שגרמו, הובילו ליתר דינמיות ולאפשרות רבה יותר לשינוי, בזכות הדה-צנטרליזציה של המוסד. השינויים שחלו באוניברסיטה פתחו כמובן אפשרויות קידום לכלל חברי הסגל האקדמי, אך היוו הזדמנות מיוחדת עבור הנשים, שבתקופות אחרות נתקלו ביותר קשיים מעמיתיהן.

עבור גולדשמידט, שבמשך שש השנים מאז סיימה את הדוקטורט לא זכתה לקידום באוניברסיטה, היתה תקופה זו חלון הזדמנויות: ב-1949 קיבלה דרגת מדרך, ב-1954 קודמה לדרגת מרצה ושלוש שנים אחר-כך, בדצמבר 1957, לפרופסור-חבר. כמו כן, באפריל 1960 נתמנתה גולדשמידט לסגן מנהל המחלקה לזואולוגיה, ובנובמבר אותה שנה נבחרה כנציגה של המרצים והפרופסורים החברים בסנט. דווקא במהלך השנים שבהן היציבות והסטטיות של המוסד נפגעו, ידעה הקריירה שלה פריחה, שנעצרה רק במקביל להתייבבות מספר הסטודנטים בראשית שנות השישים ולתהליך הצנטרליזציה המחודשת עם המעבר לקמפוס בגבעת-רם.

מהלך זה תואם את הדפוס המוכר, של נשים הזוכות בהכרה במערכת שבה הן פועלות דווקא בתקופות של שינויים וחוסר יציבות. דן מירון תיאר את הופעתן של ארבע משוררות עבריות על רקע המהפכה בברית-המועצות והאווירה המהפכנית-חלוצית בארץ-ישראל. הגירתו המאורגנת של הממסד הספרותי העברי, בהנהגתו של ביאליק, מברית-המועצות, הפכה אותו למרכז בלא סמכות של סופרים ותיקים ובעלי מוניטין, כפי שהיה גם המרכז הספרותי הארץ-ישראלי. ההקשר המהפכני, הצעיר והאנטי-

במהלך שנות השישים עוכב קידומה של גולדשמידט, דבר העשוי לנבוע מתפישות מגדריות של הסביבה. התפישת העצמית של גולדשמידט הביאה לכך שהיא קיבלה את הסיטואציה, אף שבמרירות ובלית ברירה. זאת לעומת עמיתיה הגברים, שכאשר נתקלו בבעיות דומות שלחו מיד מכתבים חריפים ואיימו בהתפטרות. גולדשמידט לא מחתה בצורה אקטיבית ולא איימה בהתפטרות. בכל שנותיה באוניברסיטה העברית, מעולם לא נקטה לשון חריפה כלפי הממונים עליה.

הקשיים שניצבו בפני כל אחת מהמדעניות, בהיותן חלק ממיעוט נשי שפעל בתוך מסגרת תובענית ותחרותית שהאתוס שלה גברי, לא ריפו את ידיהן ולא עצרו את התקדמותן. אבחן כעת מה היו הדרכים והתנאים שאפשרו להן להתמודד בהצלחה עם האתגרים ולהביא לידי מיצוי את יכולתן האינטלקטואלית ואת כישוריהן המדעיים.

סוד ההצלחה

דיסציפלינות חדשות ופריפריאליות

גם גולדשמידט וגם פיינברון התמחו בגנטיקה, פיינברון כתחום הוראה וכטכנולוגיה המסייעת במחקר הציטולוגי והסיסטמטי, וגולדשמידט – כשדה המחקר העיקרי והיחיד. העובדה שהיו מומחיות עיקריות בתחום חדשני באותה תקופה אפשרה להן למצוא את מקומן באוניברסיטה העברית. הדבר נכון גם לגבי ברכה רמות, שהתמחתה בהמטולוגיה, שהיתה דיסציפלינה חדשה בישראל של אותם ימים.

דה-צנטרליזציה וחוסר יציבות

שלוש המדעניות שהצגתי זכו להתקדמות בקריירה שלהן דווקא בעתות מלחמה ובתקופות של חוסר יציבות במוסדות שאליהם השתייכו.

נעמי פיינברון הצטרפה לאוניברסיטה העברית כאשר זו רק נוסדה, וברכה רמות החלה לעבוד בתל-השומר בשנותיו הראשונות. רמות שירתה בפלמ"ח ופגשה במהלך המלחמה בשיבא ובפדה, מה שהוביל לפנייתה ללימודי רפואה במחזור הראשון באוניברסיטה העברית.



"עד כמה אני דומה לאמא?" ילדים והורים יושבים זה מול זה, ופניהם מתמזגות. המוצג מתייחס לשיר "פנים", מתוך ספרה של מרית זרחי "באה מלכה למלך"

ניוטון וגלילאו מחייכים בסיפוק.

מצד אחר, יש בעיה בהצהרה שהמדע והטכנולוגיה נמצאים בכל מקום סביבנו, אם הדרך היחידה להציג אותם היא במסגרות נוקשות.

אם באמת אפשר למצוא את החוקים והעקרונות הפיזיקליים בכל דבר סביבנו (טענה שטוענים לא רק אנשי המוזיאון, אלא כמעט כל העוסקים בחינוך מדעי), האתגר

סתם תערוכה קלאסית על עקרונות המכניקה, הכימיה או האופטיקה? אין לאוצר אלא לקחת את תכנית הלימודים לחטיבת הביניים, להכין רשימה של עקרונות/חוקים/תופעות, ולבנות לכל אחד מהם מוצג אינטראקטיבי (שהוא השם ה"מדעי" למשהו שילדים יכולים למשוך/לדחוף/ללחוץ ולשבור...): מנוף, בורג, מעלה משופע, גלגלת אחת, שתי גלגלות, כדורים קופצים, מכוניות מתנגשות, נוצות נופלות...



איפה המדע בכל הסיפור הזה?

תמונות: ששון תירם

מה הקשר בין השתקפות שרואים בשלולית, סיבוב צלחות על מקל, צרצור צרצרים ומכונת מזל? למען האמת – אין הרבה קשר. ואף על פי כן, נושאים אלו ויותר מ-20 אחרים (שגם ביניהם אין כל קשר...) מוצגים יחד בתערוכת "מדע – זה כל הסיפור" שנפתחה הקיץ במוזיאון המדע על שם בלומפילד בירושלים, ועוסקת בספרי ילדים משישים שנות מדינת ישראל (וקצת קודם...).

ספרי ילדים!?! אתם מן הסתם מרימים גבה: מה הקשר בינם לבין מוזיאון מדע? למה לא להציגם בספרייה עירונית?

ואכן, זו היתה השאלה הראשונה שעלתה כאשר התלבט צוות המוזיאון בבחירת נושא לתערוכת הקיץ במלאת שישים שנה למדינת ישראל. מדוע לא לבחור נושא מדעי/טכנולוגי מובהק יותר, כמו הישגי מחקר ופיתוח החקלאות בארץ, או סיפורן של חברות סטרט-אפ מצליחות, או



ילדים בונים חבית וחוקרים את תכונותיה המיוחדות. המוצג מתייחס לשיר "מעשה בחבית", המופיע בספרה של קדיה מולודובסקי "פתחו את השער"



מוצג לפי "אבא בורח עם הקרקס", ספרו של אתגר קרת (איורים: רוטו מוזן). המוצג עונה על השאלה: מדוע צלחת המסתובבת על מקל אינה נופלת?

חדש
בחנויות
הספרים



הפקיד היהודי

לכל מי שאוהב מתמטיקה ולכל מי שפוחד ממנה!

ספרות, אמנות, מתמטיקה ורומנטיקה מניעות רומן היסטורי חדש, הנפתח במעטפה מסתורית שמוצאה בהודו, ותכולתה – הוכחות מתמטיות פורצות דרך. בלבו - סיפור מערכת היחסים המופלאה והמוזרה בין ג'י. ה. הארדי, המתמטיקאי הבריטי הנודע, לבין בן חסותו, הגאון המתמטי היהודי, שריניוואסה רמנוג'ן, שהארדי הביאו לקיימברידג' ובמשך חמש שנים שיתף איתו פעולה בניסיון לפצח את השערת רימן.

להזמנות טלפוניות:

03-7683333

ידיעות ספרים *אייל*

להזמנות באינטרנט:

www.ybook.co.il



צבעונית מושלמת, ולחלופין לראות שתמונות המודפסות על נייר מורכבות מכתמים של ארבעה צבעים אחרים: שחור, צהוב, ציאן ומג'נטה (טורקיז וסגול).

תוכלו לראות את עצמכם הולכים על הקיר כמו איתמר, להסתכל על העולם מלמעלה כמו שרואה אותו הג'ירף, לנפח בלון על-ידי שאיבת אוויר מבחוץ לו, לנגן על מסרק ופורס ביצים ולהקשיב כמה מוזרים נשמעים הקולות כשהם עוברים דרך חומר מוצק ולא באוויר כפי שאנו רגילים. (ואולי בגלל זה רעש פיצוח האגוזים של הסנאית הוריד את ערך הדירה המושכרת...).

התערוכה מיועדת בעיקר לילדים. גובה השולחנות נמוך יחסית, הפעילויות פשוטות ועל רבות מהן אפשר גם לחזור בבית: חיבור (וחיסור) צבעים וכיצד אדום וירוק מתחברים לצהוב (וצהוב וציאן הופכים לירוק) אפשר לראות בעזרת זכוכית מגדלת על מסך המחשב (או על נייר מודפס); בוועת סבון כל אחד יכול לעשות באמבטיה; ואם תחזיקו כפית בין השיניים ותנקשו עליה, או תצמידו את האוזן לשולחן ותזיזו עליו כוס – תוכלו לשמוע קולות העוברים בחומר מוצק. ההסברים והוראות ההפעלה קצרים, כתובים בשפה ברורה ומלווים באיורים. חלל התערוכה מעוצב בצבעוניות רבה, ונוסף על המוצגים תוכלו לראות פריטים היסטוריים הקשורים להתפתחות ספריהילדים בארץ: הדפסות ראשונות והפקות ראשונות, איורים מקוריים, שקופיות זכוכית ועוד. בהדגמה מדעית המלווה את התערוכה מדפיסים יחד עם המבקרים חוברת בעזרת מסדרת דפוס עתיקה ומסבירים על התפתחות הדפוס: דפוס הבלט, סדר הדפוס, תהליך האופסט המודרני, חיתוך הגיליונות, הקיפול והכריכה.

והכי חשוב: למי שרוצה להיזכר בספרי הילדות שלו ולהקריאם באוזני הדורות הבאים – יש גם פינת ספרייה... ■

פרטים נוספים על התערוכה ועל מוזיאון

המדע בכלל תמצאו באתר המוזיאון:

<http://www.mada.org.il/he/exhibitions/stories.aspx>

ד"ר אמיר בן-שלום, מוזיאון המדע על שם בלומפילד, ירושלים.

המעניין הוא להציגם במסגרת רחבה יותר, הקרובה ומוכרת למבקרים במוזיאון. ומה מוכר יותר מספרי וסיפורי ילדים, שכולנו שמענו וקראנו בילדותנו ואנו מנסים להקריא לילדינו, בחלון הזמן הקצרצר מהרגע שהם מבינים את השפה עד שהם מתחברים לטלוויזיה, לסלולרי ולאינטרנט...

בחירת הספרים לא היתה קלה – מבין מאות הספרים שנכתבו בארץ (זו היתה המגבלה הראשונה – רק ספרות עברית או תרגומים של אגדות קלאסיות), נבחרו 3-4 ספרים מכל עשור. זאת כדי להראות את ההתפתחות והשינויים שהתחוללו במהלך השנים: בסגנון הכתיבה, בטכניקות האויר, בשיטות ההדפסה והכריכה. ברור שנעשה עוול לספרים רבים שלא נכנסו לרשימה, אך שטח התערוכה מוגבל.

ביחס לכל ספר נשאלה שאלה, שהיתה הגרעין למוצג האינטראקטיבי. שאלה הצצה מקריאת הספר: למה רואה פלוטו את השתקפותו בשלולית? וכיצד אפשר להפוך נסיך לצפרדע? או מהסתכלות באיורים המודפסים: כיצד מסובבים צלחות על מקל בקרקס שאבא בורח אליו? או סתם אסוציאציה העולה משם הספר: כיצד מנפחים את חמשת הבלונים? כיצד עשויה החבית שאליה בורחים הילדים? למה בוועת הסבון (שבכה מאוד...) צבעוניות? וכיצד עפים עלים ברוח?

סביב כל שאלה נבנה מוצג העונה עליה, או לפחות נותן למבקרים הזדמנות להתנסות ולהכיר את הנושא טוב יותר. כי הרי לשאלה "למה אני בוכה?" יש הרבה יותר מתשובה אחת – כך מי שיגיע למוצג יוכל לפחות לשמוע את התשובות של הילדים שביקרו בו לפניו ולהוסיף את התשובה שלו. מומחי המוזיאון יכולים לכל היותר להסביר את המנגנון הפיזיולוגי של בלוטות הדמעות...

התוצאה היא אוסף של מוצגים, שכל אחד מהם אכן עוסק בנושא שונה וייחודי. תוכלו למתוח בה קרום גדול של בוועת סבון ולראות כיצד משתנים הצבעים שבו כתוצאה מהשינויים בעוביו. תוכלו להסתכל במיקרוסקופ על הכינה נחמה (לא האמיתית, שנמצאת כרגע בחו"ל, אבל קרובת משפחה – כי כיני הראש הן זן כינים ייחודי החי רק על ראשי בני-אדם) וללמוד על ארבעת השלבים בהתפתחותה. תוכלו לשבת על כיסא מסמרים ולהבין למה אפשר להחזיק קיפוד ביד בלי להידקר. תוזמנו לראות כיצד תמונה אדומה, כחולה וירוקה המוקרנות יחד יוצרות תמונה



גופים המעניינת את הטופולוג היא למשל כמה חורים יש בגוף, תכונה שאינה תלויה בפחיסותו.

איך מגדירים במדויק מהו "חור" בגוף? נתחיל מכדור ים, ונסביר מדוע בו אין "חור". אם תציירו עליו לולאה (עקום סגור) ותחשבו עליה כעל גומייה, תוכלו לכווץ את הגומייה כך שתקטן עד שתגיע לידי נקודה אחת, כאשר הלולאה נשארת על פני הכדור לכל אורך תהליך הכיווץ. על פנימית של צמיג, לעומת זאת, אפשר לצייר לולאה שאותה אי-אפשר לכווץ בצורה כזו. למעשה אפשר לצייר שני סוגים של לולאות כאלה, אחד ל"אורך" ואחד ל"רוחב" של הפנימית (ההבדל ניכר יותר בפנימית של אופניים – שם המעגל "לאורך" הוא בעל קוטר כקוטר גלגל האופניים, ואילו המעגל "לרוחב" צר יותר, כקוטר הפנימית כשחושבים עליה כעל צינור). הלולאות האלה הן ביטוי לקיומו של חור.

השערת פואנקרה היתה שגוף סופי וסגור (חסר שפה), שבו כל לולאה ניתנת לכיווץ, הוא מבחינה טופולוגית פני כדור. כלומר, אפשר לעוותו, בלי לקרעו, כך שיהפוך לפני כדור. השמטתי כאן פרט חשוב, והוא שלא מדובר בכדור הים הרגיל שאתם מכירים, אלא בכדור ארבעה-ממדי, שפניו הם בעלי שלושה ממדים. מדוע דווקא שלושה? משום שלשני ממדים הטענה פשוטה, ולארבעה ממדים, כלומר פני הכדור החמישה-ממדי, היא אינה נכונה.

כמאה שנים נאבקו מתמטיקאים בהוכחת ההשערה. ההתקדמות באה מכיוון לא-צפוי – מן הגאומטריה, שבה דווקא כן חשובים המרחקים בין נקודות. הפותר היה מתמטיקאי רוסי בשם גרגורי פרלמן (Perelman). פרלמן הוא דמות ציורית, אפילו אקסצנטרית. הוא דחה את כל הפרסים (ובהם פרס של מיליון דולר שהובטח כמה שנים קודם לכן לפותר הבעיה) ושאר אותות הכבוד שהורעפו עליו. הוא גם סירב להצעות עבודה מפתות, וחזר לבית אמו בסנט פטרבורג, וכנראה אינו עוסק עוד במחקר מתמטי.

כל אלה, וכן ההיסטוריה של הבעיה, מתוארים בספר בצורה חיה. כמקובל בספרים פופולריים מאז "השערת פרמה" (המצליח ביותר עד כה מבין הספרים מסוג זה, פרי עטו של סיימון סינג), הקורא זוכה גם לסיפורים רבים שאינם רלוונטיים ביותר. אבל בסך-הכל הקריאה מהנה, וגם מחכימה. לזכותו של אוֹשֵׁרִי יאמר, שהוא אינו דש

ברכילויות (שאינן חסרות בסיפורו של פרלמן), אלא מספר אותן באיפוק ובעדינות.

התרגום קולח, אף כי אינו ספרותי ביותר. אי-הדיוקים בתרגום של טקסט מתמטי הם כנראה בלתי נמנעים, במיוחד בטקסט תובעני כל-כך. למשל, בעמ' 35 מוגדר "מישור פרויקטיבי" (זהו השם הנכון), ומיד אחר-כך הוא נקרא "מישור ההיטל" – כנראה תיקנו במקום אחד ושכחו לתקן במקום האחר. המילה "ייחודיות" (סינגולריות) מובאת לראשונה לפני שהוסברה. אותו דבר נכון לגבי המילה "ביניות" ("להיות בין"). המונח "קטע" נקרא במקום מסוים "קו ישר סופי". במקום אחר המילה האנגלית לקטע, "אינטרוול", מתורגמת כ"רווח", ו"הפרשים" נקראים "שאריות". אפשר היה להשקיע מעט יותר בעריכה.

סיכומו של דבר – הספר הוא שילוב מוצלח של סיפורת של הרפתקה מתמטית עם ניסיון ללמד מושגים בסיסיים בתחום מתמטי חשוב. אני ממליץ עליו בחום. ■

רון אהרוני הוא פרופסור בפקולטה למתמטיקה בטכניון. מזה כשמונה שנים הוא עוסק גם בחינוך מתמטי, בעיקר יסודי, ובעקבות התנסותו כתב ספר הדרכה להורים ולמורים, "חשבון להורים" (הוצאת שוקן 2004). ספר אחר שלו, "מתמטיקה, שירה ויופי", הופיע זה לא כבר בהוצאת הקיבוץ המאוחד.



איך משחקים בכדור ים ארבעה-ממדי

דונל או'שיי: השערת פואנקרה (Donal O'Shea, The Poincaré Conjecture, 2007), אריה ניר הוצאה לאור, 2008, תרגום מאנגלית: עמנואל לוטם, עורכת ראשית: רחל הלוי, 335 עמודים, מחיר מומלץ: 96 שקלים

של ממש. הם אינם מניחים שהקורא יודע הרבה, לא לפני קריאת הספר ולא אחריה. "השערת פואנקרה" של דונל או'שיי שונה מבחינה זו. הוא אינו מגביל את עצמו לסיפורים מחייהם האישיים של המתמטיקאים, אלא באמת מנסה ללמד את הקורא מעט מתמטיקה. זאת יש לייחס, כנראה, לכך שהכותב הוא מתמטיקאי בעצמו, ולכך שהתחום שבו מדובר, טופולוגיה, נגיש במידת-מה גם לחובבים, משום שהוא גאומטרי מאוד וניתן לתיאור בעזרת ציורים. אני יכול להעיד על עצמי שהספר הכיל חידושים גם בשבילי, אף שאני מתמטיקאי במקצועי. מצד אחר, הספר כתוב בצורה מושכת, והדרמה אינה מפסיקה לרתק. לטעמי, זהו המקצועי והטוב ביותר בכל הסדרה הארוכה שהזכרתי לעיל של ספרים פופולריים על מתמטיקה. עם זאת, אין ברירה אלא להודות שחלקים גדולים מן הספר לא יהיו מובנים לקהל הרחב, וקורא ממוצע יבין רק "בערך". המחיר הזה הוא כנראה בלתי נמנע: אי-אפשר להסביר בקצרה מושגים מתקדמים, וספרים פופולריים הנותנים תחושה אחרת מרמים את קוראיהם.

מעט על תוכן הספר. אנרי פואנקרה (Poincaré) היה מן הבולטים במתמטיקאים של סוף המאה ה-19, וממייסדי של תחום שנקרא "טופולוגיה". הטופולוגיה היא גאומטריה בלא מדידות מרחק. טופולוגים מתעניינים בתכונות של גופים הנשמרות בעיוותים רציפים, כלומר עיוותים "לא-אלימים", כאלו שאינם כוללים קריעה או גזירה. למשל, אם ניקח כדור ים (כדור מתנפח) ונשב עליו, הוא ייפחס, כלומר, המרחקים שבין הנקודות שעל פניו ישתנו. אבל בעיני הטופולוג, כל עוד הכדור לא התפוצץ הוא לא השתנה – הכדור לפני הפחיסה ואחרי הפחיסה שווים. תכונה של

המתמטיקה חווה בעשורים האחרונים פריחה שלא ידעה כמוה מעולם. בעשר השנים האחרונות נפתרו שלוש השערות מפורסמות: השערת פרמה, השערת פואנקרה ואחותן הפחות חשובה אבל לא פחות מושכת, השערת אריזת הכדורים של קפלר. בעקבות זאת, או אולי מסיבות נוספות, יש גם פריחה בכתיבה המתמטית הפופולרית. על פתרון כל אחת מן ההשערות האלה (וכן על השערה נוספת, שעדיין לא נפתרה, השערת רימן) נכתבו ספרים רבי-מכר. נוסף על כך הופיעו ספרים על מתמטיקאים בעלי סיפורי חיים מרתקים – פאול ארדש (Erdos), ג'ון נש (Nash), ג'ון פון נוימן (Von Neumann), קורט גדל (Godel) – וכן נכתבו ספרים פופולריים על נושאים מתמטיים ספציפיים.

לא לחינם נותרו ההשערות האמורות פתוחות במשך זמן רב. הן קשות מאוד, והמושגים המשמשים לפתרונותיהן נהירים רק למתי מעט. גם מתמטיקאים מקצועיים אינם מסוגלים בדרך-כלל לעקוב אחר מהלך הרעיונות, אם אינם מומחים בשטחים המתאימים. על אחת כמה וכמה שאין אפשרות להסבירם לחובבי מתמטיקה. מה יכול, אם כן, הקורא להפיק מן הספרים האלו? שני דברים. האחד הוא תחושה כללית של רוח הדברים. אם הספר מתעלה מעבר לרכילות מתמטית גרידא, הוא יכול לספר על המושגים הבסיסיים בתחום, ולהמחיש לקורא את הקשיים שעמדו בפני הפותר. האחר הוא הצצה למהותה של החוויה המתמטית, ומה פירוש הדבר להיות מתמטיקאי. ולחוויה המתמטית יש צדדים מרתקים, משום שפעמים רבות היא כרוכה במאבק קשה ועיקש בבעיות שמחזירות מלחמה שעה. רוב הספרים מן הסוג האמור מוותרים מראש על הסבר

שתיים מן השאלות היסודיות ששואלים אנשי מדעי החיים הן: כיצד נוצרו החיים (והיכן)? וכיצד התפתחו החיים לאחר ההיווצרות הראשונית? לשאלה הראשונה אין לנו עד היום תשובה מלאה, אם כי מקובל להניח שלאחר תהליך של אבולוציה כימית נוצר תא פשוט – יחסית לתאים המוכרים היום – וממנו התפתחו שלוש שושלות התאים המוכרות לנו היום: החיידקים, הארכאונים והאיקריוטים (הקבוצה האחרונה כוללת את בעלי-החיים, הצמחים והאצות, הפטריות והפרוטוזואונים). את השאלה השנייה מסבירה היום בפרוטרוט תיאוריית האבולוציה.

באמצע המאה ה-19, צ'רלס דארווין (Darwin) הוא שהעלה על הכתב בספרו "מוצא המינים" (*On the origin of species*) את הסברה שכל היצורים נוצרו אלה מאלה בתהליכים של שינויים אקראיים במידע העובר בהורשה (אז כמובן עדיין לא היה ידוע כיצד) וברירה של פרטים המתאימים יותר לסביבתם, בעקבות הבדלים בהעמדת צאצאים בין פרטים המותאמים טוב יותר לסביבתם לבין אלה המותאמים פחות.

כיום כבר מוכר החומר התורשתי (DNA או RNA) וגם מוכרים השינויים החלים בו – המוטציות, המאפשרות את הופעת השינויים האקראיים הנבררים בלחץ תנאי הסביבה. כמו כן ידוע היום, שמלבד השינויים הגנטיים החלים בפרט מסוים, הוא יכול "לרכוש" מידע גנטי חדש באמצעות קליטת חומר תורשתי משכניו. חיידקים יכולים לקלוט חומר תורשתי כפלסמידים (קטעי DNA המשוכפלים בתא החיידק בנפרד מהכרומוזום שלו) ומגוון רחב של אורגניזמים קולטים חומר תורשתי זר מנגיפים. תופעה זו מכונה העברה אופקית (Horizontal gene transfer). חוקרים יכולים להדגים במבחנה תהליכים אבולוציוניים פשוטים, כגון הופעת עמידות בפני החומר האנטיביוטי סטרפטומיצין בחיידקים. דוגמה זו נובעת משינוי של נוקלאוטיד יחיד ב-DNA, שבעקבותיו מוחלפת חומצה אמינית בודדת בחלבון S12 בריבוזום החיידקי. השינוי גורם לכך שהחלבון, האחראי על הדיוק בתהליך יצירת החלבונים בחיידק, מאבד את יכולתו לקשור את הסטרפטומיצין (המפריע לתהליך ההגה) בעוד שפעילותו המקורית אינה משתנה.

פה גם ברור שבנוכחות סטרפטומיצין, יש עדיפות ברורה לחיידקים הנושאים את המוטציה, ולכן רק הם ישרדו ויעמידו צאצאים, ובסופו של תהליך עברנו מאוכלוסיית חיידקים רגישים לסטרפטומיצין לאוכלוסייה עמידה. לגביתתהליכים מורכבים יותר, כמוהופעת אברונים חדשים, או ביצורים עילאיים יותר – איברים, שבהם ברור שמדובר בצירוף של כמה שינויים גנטיים, יש קושי להראות איך נוצרות צורות הביניים, שבניגוד לתוצר הסופי, אינן מקנות יתרון לפרט הנושא אותן. כיום אנו מכירים בחשיבותה של המקריות ההיסטורית (Historical contingency) בתהליך הופעתה של התכונה החדשה, למרות הקושי להמחישה בתנאי מעבדה.

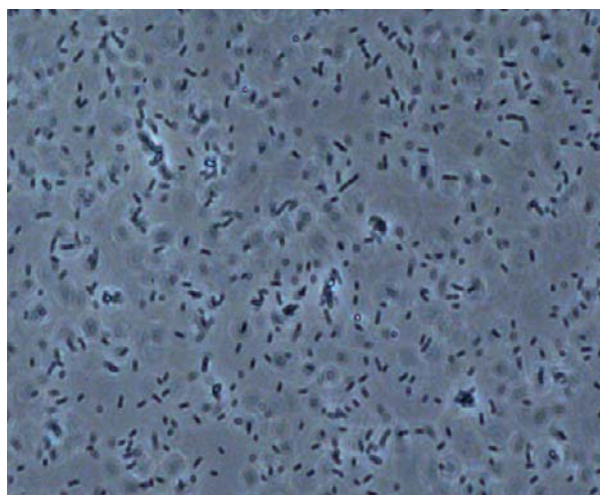
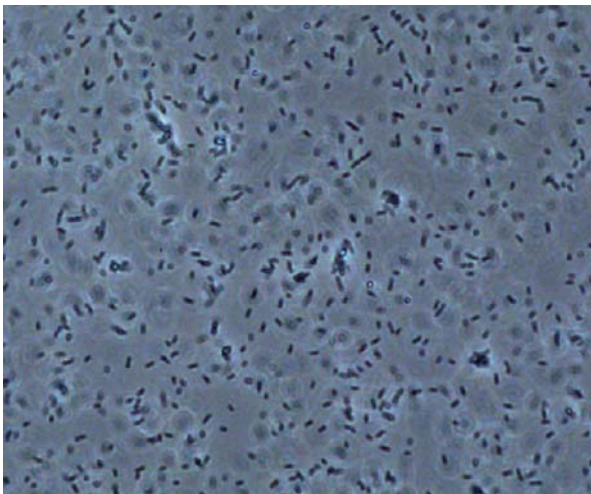
באמצעות המערכת הניסויית המתוארת להלן, שנעשה בה שימוש באוניברסיטת מישגן, הצליחו החוקרים להראות התפתחות של תכונה מורכבת יחסית בחיידק *Escherichia coli*, ואת קיומה של מקריות היסטורית ייחודית (גנטית במקרה זה). בחיידקים אלה חלו שינויים גנטיים מסוימים, שאף שלא הקנו לחיידקים הנושאים אותם יתרון על פני מתחריהם, אפשרו את הופעת התכונה החדשה. את החיידק *E. coli* הכרנו במדור זה בגיליון הקודם. אחד המאפיינים הבולטים של חיידקי *E. coli* יחסית לקוליפורמים האחרים הוא אי-יכולתם של החיידקים לגדול במצע גידול המכיל חומצת לימון כמקור פחמן יחיד. הסיבה לכך אינה מחסור באנזימים המפרקים את חומצת הלימון (הנוצרת באופן טבעי בתוך החיידק במעגל קרבס ובמסלולים אחרים), אלא מחסור בנשא חלבוני, הממוקם במעטפת החיידק, המאפשר את כניסת החומצה לתוך תא החיידק. לכן, בתנאים שגרתיים של מוטגנזה (גרימת שינויים בחומר הגנטי של החיידק), חיפוש מוטנטים Cit^+ (בעלי יכולת לגדול על חומצת לימון) של *E. coli* (שהוא במקורו Cit^-) לרוב אינו צולח. אין פלא בדבר, שכן כדי שיווצר מוטנט כזה אין די בשינוי קטן בגן, ומכאן בחלבון, קיים, אלא צריך להיווצר גן לנשא חלבוני חדש. במקרים המועטים שבהם נמצאו מוטנטים Cit^+ של *E. coli*, הם נמצאו באוכלוסיות של חיידקים ממינים שונים, והסתבר שהחיידקים המוטנטיים קלטו משכניהם פלסמיד





אבולוציה בפעולה:

כיצד "התפתח" ב-*Escherichia coli*
נשא לחומצת הלימון



של המוטציות, או במילים אחרות: למקורות הספציפית של המוטציות בתרבית.

הרבה סבלנות ומשאבים הושקעו בתכנון ובביצוע הניסוי המעניין והארוך הזה, שעודנו נמשך. נקווה שבהמשך נוכל לחזור ולדון בממצאים חדשים ממנו, שירחיבו את הבנתנו את תהליך האבולוציה.

ושאלה נוספת המתעוררת כאן: תקפות ההגדרה והזיהוי של חיידקי ה-*E. coli*. ברור לנו מדרך הביצוע של הניסוי, שאכן מדובר ב-*E. coli*. אך אילו היינו מגלים את החיידק הזה בטבע בלא להכיר את תולדותיו, היינו מגדירים אותו כמין, או אפילו כסוג חדש (בגלל היותו מנצל ציטרט). כך גם קרה בעבר עם חיידקי ה-*Shigella*, הגורמים למחלת הדיזנטריה, שהוגדרו כסוג חדש, בגלל חוסר התנועה האופייני להם (אין להם שוטונים, בניגוד לשאר הזנים של *E. coli*). רק הבדיקה הגנטית הראתה שגם הם בעצם אינם אלא חיידקי *E. coli*. ■

תודה לד"ר שרה שורץ ולאהוד לם על הערותיהם המועילות.

ד"ר דרור ברניר מלמד מיקרוביולוגיה וביולוגיה של התא באוניברסיטה הפתוחה.

לקריאה נוספת:

Zachary D. Blount, Christina Z. Borland, and Richard E. Lenski (2008), Historical contingency and the evolution of a key innovation in an experimental population of *Escherichia coli*. *PNAS* 105 (23) 7899-7906.

קישור לתקציר המאמר:
<http://www.pnas.org/cgi/content/abstract/105/23/7899>

האתר של ריצ'רד לנסקי:
<https://www.msu.edu/~lenski/>

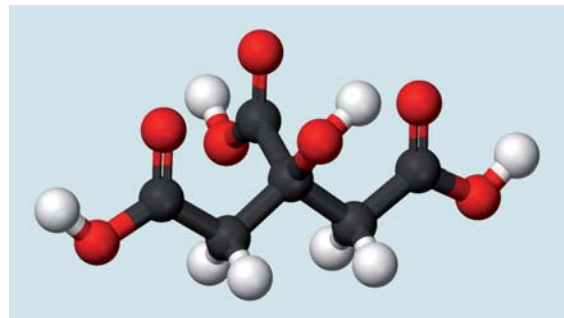
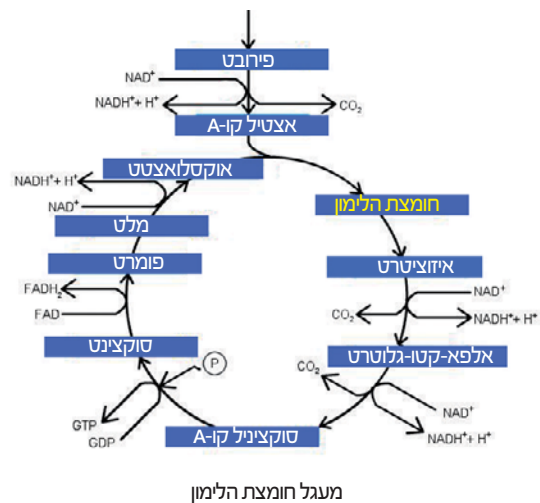
כלל בתריסר התרביות במהלך למעלה מ-30,000 דורות. בכל 500 דורות נאספה דגימה מכל תרבית והוקפאה – וכך נוצר מאגר של "חיידקים מאובנים", שהיה אפשר לחזור ולחקור אותם לפי הצורך.

סוף-סוף, לאחר כ-33,000 דורות, התחולל באחת התרביות השינוי המיוחל. באחד החיידקים שבאחד הקווים חלה מוטציה שאפשרה לו לנצל את הציטרט כמקור פחמן. צאצאיו של חיידק זה השתלטו על התרבית בזכות יכולתם לנצל ציטרט. לאחר בדיקת הסמנים הגנטיים המקוריים של החיידקים, כדי לשלול אפשרות של זיהום (כפי שקרה לא מעט במהלך הניסוי, ואז סולקה התרבית המזוהמת והחוקרים חזרו לתרבית קודמת שהוקפאה כדי לשוב ולהמשיך ממנה את הניסוי), ולאחר בדיקה שהחיידקים גדלים גם במצע המכיל ציטרט כמקור פחמן יחיד, יכלו החוקרים להכריז שהמטרה הושגה.

הנחת העבודה של החוקרים היתה, שבחיידק מנצל הציטרט חלה יותר ממוטציה אחת, והשילוב של שתי מוטציות (או יותר) מסוימות אפשר כניסת ציטרט לתא. כאן הוכנסו מחדש לתמונה החיידקים ה"מאובנים". החוקרים חזרו לתרביות המוקפאות, ובדקו ממתי הפכה לסבירה האפשרות של הופעת מוטציה Cit^+ . הבדיקה העלתה שב-31,000 הדורות הראשונים של הניסוי לא חל שינוי מקדים כלשהו שיאפשר הופעת מוטנטים Cit^+ . ואולם, בשלב כלשהו בין דור 31,000 לדור 31,500, חלה מוטציה מקדימה כלשהי באחד החיידקים, שלא השפיעה כלל על הפנוטיפ (קרי, יכולת ניצול הציטרט של החיידקים), אך שכתוצאה ממנה היה אפשר בהמשך לבודד מוטנטים Cit^+ בתדירות משתנה. האם גם מוטציה זו, שחשוב עתה לגלות מהי, תלויה במוטציה קודמת (לאור התדירות הנמוכה שבה התרחשה)?

קצת נותר לברר, מהן שתי המוטציות שהתרחשו, וכיצד הן מאפשרות כניסת ציטרט לחיידקים – כך שעדיין רבה המלאכה. המוטציה המקדימה (ואלה המקדימות אותה – שגם אותן יהיה כדאי לנסות ולאתר) המחישה את חשיבות המקורות ההיסטורית בתהליך האבולוציה: ההתפתחות האבולוציונית אינה תוצאה של מוטציות בסדר אקראי. יש חשיבות רבה (שאותה אנו מגלים בדיעבד) לסדר ההתרחשות

חומצת הלימון



מודל כדור ומקל של חומצת לימון. בשחור: פחמן, באדום: חמצן, בלבן: מימן

חומצת הלימון (Citrate) היא חומר חשוב בכל תא חי. אחד התפקודים המוכרים ביותר של חומצת הלימון הוא כחומר ביניים במעגל קרבס (הנקרא גם על שמה - מעגל חומצת הלימון). מעגל קרבס "משתתף" בנשימה האווירנית ובמטבוליזם של שומנים וחומצות אמיניות.

12 התרבויות נזרעו במצע המכיל כמקורות פחמן מעט גלוקוז (25 mg/L) ובעיקר חומצת לימון (סודיום ציטרט - 0.5 gr/L), וגודלו בטלטול בתנאים אווירניים. בכל יום נמהלה התרבית ביחס של 1:100 במצע חדש.

כבר בשנים הראשונות של הניסוי חלו בכל תריסר הקווים מוטציות (שונות!), ששיפרו את קצב הגדילה של החיידקים במצע הנתון - עד כ-75% מהר יותר יחסית לחיידקים המקוריים. ואולם, מוטציות המאפשרות כניסה של ציטרט - שאותן אפשר לזהות בקלות, בגלל הגדלה משמעותית של כמות החיידקים במבחנה - לא הופיעו

הנושא גן לנשא מתאים (לאמור - העברה אופקית). בשנת 1988 החלו החוקרים זכרי בלאונט (Blount) וכריסטינה בורלנד (Borland), במעבדתו של ריצ'רד לנסקי (Lenski), בניסוי שנתאר להלן. מאז נמשך הניסוי כבר 20 שנה. במהלך הניסוי הממושך הצליחו החוקרים למצוא מוטנט Cit^+ של *E. coli*, באוכלוסייה מבודדת מהסביבה ומחיידיקים אחרים - כך שהתפתחות התכונה החדשה נבעה משינויים גנטיים בצאצאי החיידקים המקוריים. בתחילת הניסוי נזרעו 12 תרביות זהות (שמקורן באותה מושבה) של זן מעבדה של *E. coli*, שאפשר לזהותו באמצעות סמנים גנטיים ספציפיים.

המקורי למפרש שמש העלה מדען הטילים הרוסי פרידריך צאנדר (Tsander) עוד בשנת 1920. צאנדר, אגב, הוא שתכנן את הרקטה הראשונה המונעת בדלק נוזלי של ברית-המועצות. הבסיס הפיזיקלי למפרשיות השמש הוא העובדה שקרינה הפוגעת בגוף כלשהו מפעילה עליו כוח. אין חשיבות לסוג הקרינה, והיא יכולה להיות בתחומי האור הנראה, האינפרה-אדום, גלי המיקרו וכדומה. מפרשיות שמש שיפעלו בחלל יוכלו להשתמש בקרינה מהשמש או לחלופין באלומת לייזר או גלי רדיו שישוגרו אליהן מכדור-הארץ, מהירח או מלוויינים.

הכוח שמפעילה קרינת השמש, במרחק ממנה שבו נמצא כדור-הארץ (מרחק ממוצע של כ-150 מיליון ק"מ) הוא זעיר – כתשע מיליוניות ניוטון למטר מרובע של חומר מחזיר אור. מכאן שמפרשית שמש תצטרך להיות מצוידת במפרש בעל שטח פנים עצום, ומסתה תצטרך להיות קטנה ככל האפשר, על מנת להשתמש בשיטת הנעה זו. יעילותו של מפרש שמש היא פונקציה של יכולת החזרת הקרינה שלו. ככל שתוחזר ממנו יותר קרינה (כלומר פחות קרינה תיבלע בו), הדחף שישפק המפרש יגדל. אם נרצה להקטין את שטח המפרש, נוכל להסתייע במקור קרינה מלאכותי, למשל לייזר. השימוש במקור קרינה מלאכותי יאפשר גם למקד את אלומת האור במפרש באופן יעיל – דבר שיביא להקטנת שטח המפרש. יחד עם זאת, יש לזכור כי מפרשי שמש שיחזירו את אור השמש לא יהיו תלויים באספקה חיצונית של קרינה ממקור מלאכותי, ובכך יש כדי לפשט את תפעולם בחלל.

ממה ייתפרו מפרשי השמש?

הדרישות הטכניות מהמפרש הן מסה נמוכה, יכולת גבוהה להחזרת קרינה, ויכולת לאחסנו במצב מקופל ולפרשו בחלל. החומר הנראה כיום כמתאים

בסיפור המדע הבדיוני הקצר "הרוח הנושבת מן השמש" (שנכתב בשנת 1963), מתאר ארתור סי. קלארק (Clarke) מירוץ של מפרשיות סולאריות מכדור-הארץ לירח ובחזרה. בחזונו הבדיוני ראה קלארק יצירה של ספורט חדש למיליארדרים – טיסות חלל המסתמכות על דחף הפוטונים הפוגעים במפרשי ענק דקיקים. הכוח שמפעילים הפוטונים גדול פי 5,000 לערך מהדחף של חלקיקי רוח השמש, הפוגעים אף הם במפרש (עם זאת, קיימים תכנונים למפרשים סולאריים מיוחדים, שיעשו שימוש גם ברוח השמש).

כיום עדיין אין תחרויות מאוישות של טיסות חלל המשתמשות בפוטונים או ברוח השמש ככוח מניע, אך חלליות בלתי מאוישות העושות שימוש ברעיון אכן נבנו. אחת מהן אף שוגרה אל החלל, ואולם, עקב כישלון של טיל השיגור לא הצליחה להגיע למסלול ולפרוש את מפרשיה. חלום המפרשים הסולאריים הוא אמנם תיאורטי, אך בכנסים מדעיים ובמחקרים שונים הוא נראה כמבטיח מאוד – במיוחד למשימות מחקר בלתי מאוישות של מערכת השמש, היכולות ליהנות מחיסכון גדול במסת החללית, ומכאן גם בהוצאות השיגור. במאמר זה נסקור בקצרה את תחום מפרשי השמש ויישומי החלל המתאימים להם. (על מפרשי שמש ראו גם: חגי נצר, "להפליג אל הכוכבים", מתוך "ספינות כוכבים", "גליליאו" 34; יורם אורעד, "ספינות החלל פורשות מפרש", "גליליאו" 43; יורם אורעד, "ושוב: מפרשית למאדים", מדור החדשות, "גליליאו" 82; יורם אורעד, "לדהור על כנפי רוח השמש", מדור החדשות, "גליליאו" 118).

מפרש שמש - מהו?

מפרש שמש הוא משטח גדול בעל כושר החזרה גבוה של קרינה (למשל, של אור בתחום הנראה), המסוגל לנוע בחלל ולשמש מקור דחף לחלליות. את הרעיון





שומי שומי ספינת... (הסולארית)



איור של חללית המצוידת במפרש שמש

הפוך לריבוע המרחק ממקור האור. פתרון אפשרי לירידה הזרמטית בהספק הקרינה יכול להיות שיפור ביכולת ההחזרה של החומר שממנו ייבנה המפרש מחד גיסא, ושימוש במקורות אור מלאכותיים דוגמת לייזר מאידך גיסא. לוויינים המצוידים בלייזרים להנעת מפרשיות שמש אינם בנמצא כיום, אך בעתיד, עם הפיכתן של מפרשיות שמש לנפוצות, ייתכן שישוגרו לוויינים כאלה למקומות שונים במערכת השמש.

יישומים אפשריים

שימוש במייזרים (Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation) יכול – עקרונית – לאפשר האצה של מפרשיות שמש למהירויות אדירות, ולאפשר לראשונה לבנות חללית בין-כוכבית ולהגיע בחלליות מחקר אל כוכבים (שמשות) שכנים. מפרשיות שמש יוכלו להניע חלליות גם בתוך מערכת השמש שלנו, במיוחד חלליות קטנות וקלות. קיים תכנון לשיגור ננו-לוויין (NanoSail-D); וראו "לוויין קטן שלי" במדור זה, "גלילאו" (117) שיצויד במפרש שמש קטן, לבחינת ההיתכנות של שימוש בהנעה סולארית לננו-לוויינים. יש הצעות – הנראות נכון לימינו כלקוחות מעולם המדע הבדיוני – לשימוש במפרשי שמש להטיית אסטרואידים המסכנים את כדור-הארץ; בשלב זה, המסה הגדולה של האסטרואידים, בשילוב עם הדחף הנמוך של מפרשי שמש, הופכים את הפתרון ללא-מעשי. אך בעתיד, במיוחד עם פרישת מערך לייזרים ומייזרים בחלל, יהיה אפשר לחשוב על מערכת להגנת כדור-הארץ מפני אסטרואידים, שתעשה שימוש בטכנולוגיה זו. ■

טל ענבר הוא ראש המרכז לחקר החלל, מכון פישר למחקר אסטרטגי אוויר וחלל, ויו"ר אגודת החלל הישראלית.

לקריאה נוספת:

אתר המרכז חומרים בנושא מפרשיות שמש:
<http://www.solarsail.org/>

אתר הננו-לוויין הראשון, NanoSail-D, שיפוש מפרש שמש:
http://www.nasa.gov/mission_pages/smallsats/nanosaild.html



ננו-לוויין (במרכז התמונה) עם מפרש שמש בעת בדיקות קרקעיות באדיבות נאס"א

חסרונות

נוסף על הקשיים הטכניים הכרוכים בבניית מפרש שיהיה רפלקטיבי דיו, קל משקל וניתן לקיפול ולפרישה, המכשול הבולט ביותר הוא יכולת התנועה של מפרשית השמש באותו כיוון של הקרינה. יכולת התמרון של החללית – ובכלל זה בלימה בהגיעה ליעדה – מוגבלת, ובשלב זה של תכנון מפרשיות שמש, יותקנו בהן גם כמה מנועי תמרון קונוונציונליים. המפרש העצום בגודלו יהיה חשוף לסכנת פגיעה של גופים, הנדירים אמנם בחלל, ובכל זאת קיימים. התנגשות עם מטאורואיד קטן לא תגרום לנזק רב: גוף כזה ייצור קרע קטן במפרש ויעבור דרכו. אך היתקלות בגוף גדול יותר, כמו אסטרואיד, תהיה הרסנית. חוזק המפרשים המצויים כיום בתכנון לא יאפשר שרידות במקרה של התנגשויות, ולכן צריך יהיה לתכנן את נתיב המפרשית תוך התחשבות בגרמי שמיים קטנים (שביטים ואסטרואידים) בתוך מערכת השמש. מובן שגם מעבר דרך טבעות פלנטריות (דוגמת מערכת הטבעות של שבתאי) לא יהיה אפשרי.

בעיה נוספת היא עוצמת ההארה של השמש כשהמפרשית מתרחקת ממנה. כידוע, עוצמת ההארה נמצאת ביחס



ונבנתה על-ידי משרד התכנון באבאקין (Babakin) הרוסי, והיא שוגרה לחלל באמצעות משגר לוויינים שהוסב מטיל בליסטי, מתוך צוללת רוסית. למרבה הצער, השיגור, שנעשה ביוני 2005, נכשל, עקב בעיה בשלב השני של הטיל, והחללית לא הגיעה לחלל. בימים אלה נבנית החללית קוסמוס 2, המיועדת לשיגור בעוד שנים ספורות.

יתרונות מפרשיות השמש

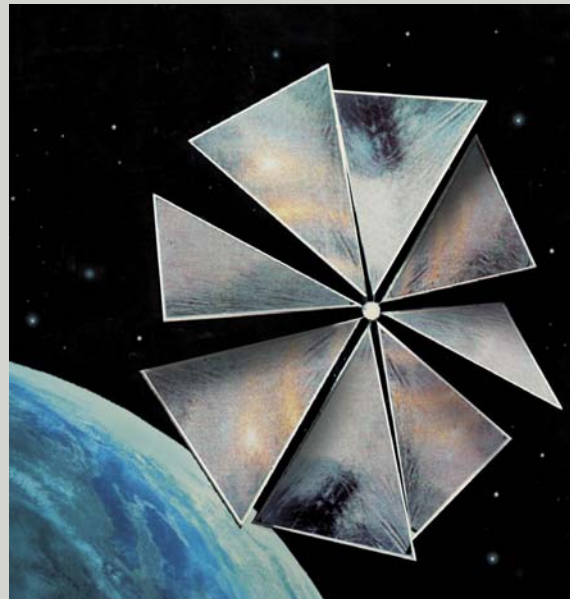
החלליות המשמשות אותנו מואצות בשלב הראשון של מסען לחלל באמצעות טילים, המקנים להן מהירות מספקת לכניסה למסלול סביב כדור-הארץ (כשמונה קילומטרים בשנייה). ואולם, אם ברצוננו לטוס למקום אחר, מחוץ למסלול הקפה זה, למשל לירח, למאדים, לנוגה או למערכת השמש החיצונית, עלינו להגביר את מהירות החללית. פעולה זו מתבצעת על-ידי מנועים רקטיים השורפים דלק (וחמצן) – מסה היכולה להסתכם במאות קילוגרמים, הבאה על חשבון המטען המועיל של החללית. חלליות ספורות עשו עד כה שימוש במנוע יוני, המשתמש ביוני קסנון המואצים באמצעות שדה מגנטי רב-עוצמה ונפלטים מהחללית. מנוע כזה הוא חסכוני יותר מבחינת חומר ההדף, אך מייצר דחף קטן מאוד (לאורך זמן). חלק ניכר מהכוח של המשגר מושקע, אם כן, בהאצה לחלל של מסה המתכלית בתוך פרק זמן קצר – הדלק של החללית. מובן שנוסף על הדלק שומה עלינו להביא בחשבון את המסה של המכלים לאחסונו, של מערכת ההולכה שלו ושל המנועים עצמם. שימוש במפרש שמש יאפשר להקטין את מסת החללית ולתעל את רוב האנרגיה להאצת המטען המועיל, ולא מסה גדולה של מערכות המנועים.

היתרון הגדול ביותר הוא שאפשר להאיץ מפרשית שמש במשך זמן ארוך מאוד – כל עוד תפגע קרינה במפרש, החללית תמשיך להאיץ. בעיקרון, באמצעות לייזרים רבי-עוצמה ותכנון נאות של המפרש אפשר להאיץ מפרשיות שמש למהירויות גבוהות ביותר, עד כדי עשרות אחוזים ממהירות האור – מהירות ששום הנעה קונוונציונלית – כימית או גרעינית – המשמשת אותנו כיום אינה יכולה להשיג.

ביותר למפרשי שמש המחזירים את אור השמש הוא רשת אלומיניום דקיקה, ובה חורים זעירים בקוטר של מחצית אורך הגל שאותו אנו מעוניינים להחזיר. בליטות ננומטריות יפלטו לחלל קרינה בתחום התת-אדום. חומר זה קיים כיום, אך חוזקו המכני אינו מספיק לקיפול (עבור שלב השיגור) ופרישה בחלל. החללית קוסמוס 1, מפרשית השמש הראשונה, עשתה שימוש ביריעות מייילר (Mylar – חומר פלסטי) מצופה אלומיניום (הדומה ל"שמיכת המילוט" המוכרת למטיילים, חיילים וספורטאים). יפן בחנה בהצלחה פרישה של מפרש שמש קטן עשוי מייילר לצורכי ניסוי, באוגוסט 2004.

קוסמוס 1

החללית קוסמוס 1 היתה מפרשית השמש הראשונה בעולם, והיתה ראשונית בהיבט נוסף – את התקציב לפיתוחה, לבנייתה ולשיגורה אסף ארגון ציבורי (The Planetary Society) מכספי תרומות. החללית תוכננה



איור של החללית קוסמוס 1, החללית הראשונה המצוידת במפרש שמש

אלקטרוני - כן; מוח - לא

בעשרים ביוני 2008 נחגג יום השנה השישים להפעלתו של המחשב האלקטרוני הראשון – יום שנקרא "Digital60 Day" (קישור בסוף הטור). ליתר דיוק, מחשב זה, שזכה לשם החיבה "בייבי", היה המחשב הראשון שהיה בעל "תוכנה מאוכסנת" (Stored-program computer), כלומר הוא היה יכול לפתור בעיות שונות על-ידי כך שמפעילו טענו לזיכרון המחשב תוכנות מחשב שונות. זו היתה התקדמות משמעותית בהשוואה למחשבים האלקטרוניים שבאו לפניו, שכדי לתכנת אותם היה צורך בחיבור ידני של כבלים בין שקעים שונים בלוח הבקרה של המחשב (אפשר להשוות את ההבדל להבדל בין מרכזיות הטלפונים הישנות, שדרשו מאנשים היושבים במרכזייה לחבר פיזית בין המשוחחים, לבין המרכזיות שבאו אחריהן, המבצעות חיבור אוטומטי בהתאם למספרים שחייגו המתקשרים).

שמו הרשמי של "בייבי", המחשב שהופעל ביוני 1948 באוניברסיטת מנצ'סטר באנגליה, היה SSEM, ראשי תיבות של "מכונה ניסויית בקנה-מידה קטן" (Small-Scale Experimental Machine). התוכנה הראשונה שהריץ עסקה בפירוק מספר לגורמים, מטלה שעדיין מעסיקה מחשבים רבים בהקשרים של הצפנה ושבירת צפנים. כדי לפתור את הבעיה הוא ביצע 3.5 מיליון פעולות במשך 52 דקות – קצת יותר מאלף פעולות לשנייה.

המחשבים האלקטרוניים הראשונים עוררו עניין רב בציבור הרחב, ואמצעי התקשורת החלו לכנות אותם "מוחות אלקטרוניים". הכינוי ביטא את הרושם הרב שהשאיר על הצופים מחשב שיכול לכפול מספרים בני עשר ספרות זה בזה תוך כאלפית השנייה. מהירות זו נתפשה כמוכיחה את עליונות המחשב האלקטרוני על המוח האנושי, שנוקק לזמן ארוך בהרבה עבור אותה משימה. המהנדסים שבנו את המחשבים ידעו כמובן כי יצירי כפיהם רחוקים מאוד מהיכולת לחשוב, אבל סביר כי גם הם ציפו שתוך זמן קצר, עם התקדמות הטכנולוגיה וכתיבת התוכנה המתאימה, מחשבים יוכלו לא רק לחשוב אלא לעשות זאת טוב בהרבה מהאנשים שבנו אותם. עברו שנים לא-מועטות עד שהחלו מומחי המחשבים להבין את הפער הענקי שבין חישוב לבין חשיבה, ועוד זמן רב לאחר מכן עד שהצליחו להסביר זאת לציבור.

עכשיו, שישים שנה מאוחר יותר, לביטוי "מוח אלקטרוני"

יש משמעות חדשה, שייתכן שבכוחה לצמצם מאוד את הפער. אולי הפעם, המילה "מוח" שבביטוי תהפוך ממטפורה לשם עצם פשוט ועובדתי.

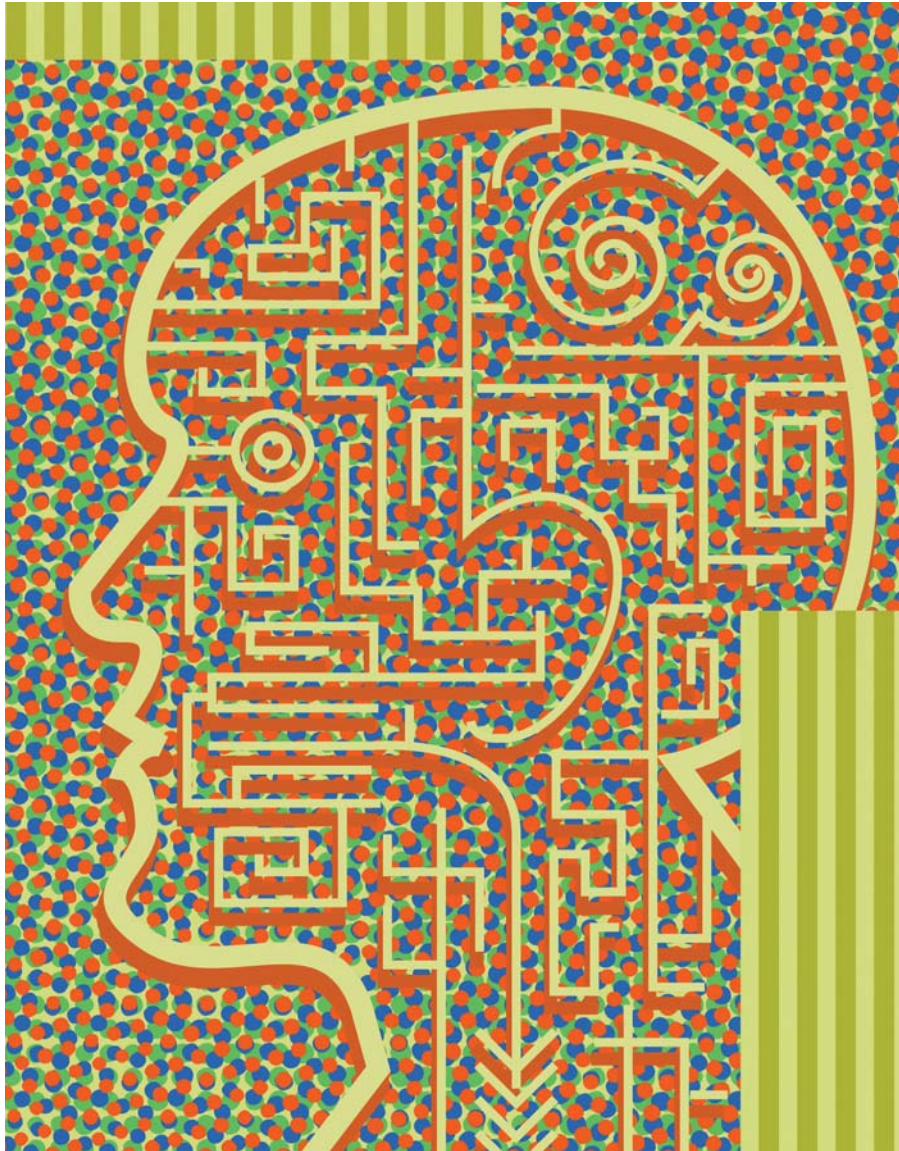
סימולציה של מערכת הראייה

בתחילת יוני 2008 הופעל לראשונה במעבדות הלאומיות של ארצות-הברית בלוס-אלמוס שבניו-מקסיקו "מחשב-על", כלומר מחשב בעל ביצועים גבוהים במיוחד. המחשב, ששמו הוא "Roadrunner" (כשם הציפור המדברית המהירה, שהיא גם הציפור הלאומית של מדינת ניו-מקסיקו), הגיע למהירות של 1.144 קוודריליון פעולות בשנייה. קוודריליון, לפי המינוח האמריקני, הוא המספר 1,000,000,000,000,000 – אחד ואחריו 15 אפסים. יחידת המידה המשמשת למהירות חישובים היא "פלופס" (FLOating point – FLOPS – Operations Per Second) – "פעולות נקודה-צפה לשנייה" (הביטוי "נקודה צפה" מתייחס לשימוש במספרים שמיקום הנקודה העשרונית בהם ניתן בנפרד, כך שאפשר לעסוק במספרים גדולים מאוד או קטנים מאוד כאשר הדבר נדרש). כנהוג במדע ובהנדסה, עבור מספרים גדולים משתמשים בקידומות: "קילו" עבור אלף, "מגה" עבור מיליון ו"ג'יגה" עבור ביליון (אלף מיליונים, לפי המינוח האמריקני). עבור מהירות המחשב החדש נדרשת קידומת פחות מוכרת: "פֶּטָה" (peta). לכן מציינים בגאווה בוני המחשב, מחברת IBM וממעבדות לוס-אלמוס, כי המחשב שלהם הוא הראשון בעולם ששבר את המחסום של פטה-פלופס אחד.

כדי להמחיש עד כמה מהירות זו גבוהה, נניח כי העולם מכיל כעשרת אלפי מיליונים של בני-אדם, וכי כל אחד מהם מסוגל לבצע חישוב אחד בשנייה (הנחה אופטימית למדי, אפילו בסיוע מחשבון, אם מדובר בהכפלת מספרים מרובי-ספרות). "מחשב אנושי" זה יזדקק למאה אלף שניות (קצת יותר מיממה) כדי להגיע לאותו מספר פעולות ש-Roadrunner מבצע בשנייה אחת. המטרה העיקרית שעבורה נבנה המחשב היא לתמוך בתחזוקת מאגר הנשק הגרעיני של ארצות-הברית על-ידי ביצוע החישובים המורכבים הנדרשים כדי להעריך את אמינות המתקנים הגרעיניים המזדקנים, בלי להזדקק לניסויים גרעיניים-תת-קרקעיים. הוא ישמש גם לחישובים מדעיים רבים, כמו מחקרי שינויי אקלים ומודלים של "אנרגיה אפלה" ו"חומר אפל".



מוח אלקטרוני - שישים שנים אחרי



הצילום: אימג'בנק / Getty Images

נפלאות התבונה, נפלאות המוח

כדי להגיע למהירותו המסחררת, משתמש המחשב Roadrunner ב-12,960 מיקרו-מעבדים מתוצרת חברת IBM. מעבדים אלה שייכים לאותה המשפחה של המעבדים המפעילים את עמדות המשחק החדשות של חברת סוני, וכל אחד מהם מכיל כמה "ליבות", כך שהוא יכול לבצע כמה חישובים במקביל. למהירות רבה נדרשת אנרגיה רבה: המחשב צורך הספק של כשלושה מגה-ואט, כפי שצורכים כמה אלפי משקי בית ממוצעים. Brain Box ישתמש כנראה במספר גדול יותר של מעבדים, שכל אחד מהם יוכל להיות אטי ופשוט יותר, וכך יושג חיסכון מסוים בצריכת האנרגיה; אך ברור כי הוא יהיה רחוק מהחסכוניות של המוח האנושי. כל המאמץ ההנדסי, השקעת הכסף (כ-120 מיליון דולר) והאנרגיה הרבה מספיקים רק כדי להביא את Roadrunner לנקודה שבה אפשר לבצע הדמיה של חלק קטן מתפקודי המוח האנושי. כך עוזר לנו המחקר לא רק להגיע להבנה עמוקה יותר של תפקודי המוח, אלא גם להעריך יותר את מורכבותו וייחודו. ■

ישראל בנימיני עובד בחברת ClickSoftware בפיתוח שיטות אופטימיזציה מתקדמות.

קישורים

אתר יום השנה השישים למחשב האלקטרוני הראשון:
<http://www.digital60.org>

מחשב-על משמש להדמיה של מערכת הראייה:
http://www.lanl.gov/news/index.php/fuseaction/home.story/story_id/13602

הכרזה על פרויקט Brain Box:
<http://www.cs.manchester.ac.uk/aboutus/newsevents/press/2006/01-07-06>

פרויקט המחקר Chatter box:
<http://www.physorg.com/news132497017.html>

בחדש יוני השנה הוכרז על פרויקט תוכנה חדש הקשור לאותו מחשב. הפרויקט, המהווה שיתוף פעולה בין פסיכולוגים לבין מדעני מחשב באוניברסיטת מנצ'סטר, נקרא Chatter Box. השם הוא משחק מילים: אפשר לקרוא זאת כ"קופסת פטפוט" וכהתייחסות לשם המחשב שעליו תופעל התוכנה, או כמשמעות המילה האנגלית chatterbox – פטפון.

לאורך חמש השנים הבאות, מתכוונים החוקרים להפעיל על גבי המחשב Brain Box (כאשר יהיה מחשב זה מוכן) הדמיה של החלקים במוח הקשורים לתפקודי שפה – קריאה, דיבור ושליטה במילים בסיסיות באנגלית. יכולתו של המחשב לדמות מספר מציאותי של תאי עצב, בזמן אמיתי, היא החידוש העיקרי, ובה תולים החוקרים את תקוותיהם.

ננסה לרגע לדמיין מה יכולות להיות התוצאות של ההדמיות שיבצעו שני המחשבים שהזכרנו. אם הדמיות אלו לא יתקרבו לביצועים אנושיים, נצטרך להסיק מכך כי חסר משהו בהבנתנו את פעילות המוח. הפער בהבנתנו עשוי להיות תהליכי, למשל בתפקידה של הלמידה ובדרך שבה היא פועלת. לחלופין, הפער עשוי להיות מבני או תפקודי: ייתכן כי המודלים שלנו לגבי הצורה שבה פועלים תאי עצב אינם נותנים לנו את התמונה השלמה.

מצד אחר, אם תצליח התוכנה להגיע לתפקודים ברמה אנושית, האם נוכל להצהיר כי אכן בנינו מוח דמוי-אנושי? קל לטעון שלא, מכיוון שתוצאות דומות אינן מוכיחות כי מקורן במנגנונים דומים. אפשרות אחת לבדוק טיעונים כאלה היא לגרום לצורות שונות של נזק במערכת הנוירונים. למשל, המדענים מצפים כי אם ינתקו חלק מתאי העצב או מהקישורים שביניהם בתוך מערכת Chatter Box, ייווצרו פגמים בתפקודי השפה הדומים לפגמים המופיעים כאשר נפגעים חלקים מקבילים במוח האנושי, כפי שקורה בחלק מהמקרים של שבץ. החוקרים מצפים גם לתרומה מעשית: הם שואפים לדמות את האפקט של טיפולים שונים כדי לבחון לאיזה מהטיפולים יש סיכויי ההצלחה הטוב ביותר בקרב מטופלים אנושיים.



מחשב המסוגל להגיע לרמות אנושיות בעיבוד מידע חזותי: בכל שנייה, כאשר אנו הולכים ברחוב למשל, אנו רואים ומפענחים תנועות של אנשים ומכוניות, מזהים חפצים מוכרים, מחפשים שלטי רחוב, נוהרים שלא לדרוך על אנשים אחרים או על מפגעים תברואתיים, ותוך כדי כך מצליחים גם לחשוב על דברים אחרים. יש ערך מדעי רב בהבאת מחשב להישגים דומים. אף יותר מכך, קיים פוטנציאל עצום לשימושים מסחריים: רובוטים שיפעלו בתוך סביבה אנושית במקום להיות מוגבלים לאזורים "סטריילים", מכוניות שנוהגות בעצמן, זיהוי מצבי סכנה ועוד.

אם ההדמיות של Roadrunner יובילו להתקדמות משמעותית בחיקוי פעולת המוח והישגיו, יהיה המחשב סוף-סוף מתמודד ראוי על התואר "מוח אלקטרוני". לעומת זאת, אם לא יתגשמו התקוות, נוכל ללמוד גם מכך: המסקנה עשויה להיות כי יש עדיין פערים גדולים בהבנתנו את תפקודי המוח, לא פחות מהפערים שעליהם למדנו מאז הופעת ה"מוחות האלקטרוניים" של לפני שישים שנה.

קופסת הפטופוט

למדענים מלוס-אלמוס יש שותפים לחלומם. באוניברסיטת מנצ'סטר – ערש לידתו של "בייבי" – החלו בשנת 2006 בפרויקט "קופסת המוח" (Brain Box – קישור בסוף הטור), שמטרתו לבנות סוג חדש של מחשב. בניגוד ל-Roadrunner, המבוסס על מיקרו-מעבדים קונוונציונליים, יהווה המבנה של Brain Box חיקוי טוב יותר של מבנה המוח, בהיותו מורכב ממספר גדול מאוד של מעבדים פשוטים המקושרים זה לזה. לפרויקט כמה מטרות, וביניהן חיקוי מבנים ביולוגיים כדי ליצור מחשבים "חסיני-תקלות" – מחשבים המסוגלים להמשיך לפעול ביעילות גם כאשר חלקים מהם נפגעים. מטרה אחרת היא לחקור תיאוריות שונות של פעילות המוח באמצעות הדמיה של מספרים גדולים של נוירונים וניתוח מאפייני פעולה המקבילים למאפייני מוח ביולוגי, כמו תבניות "גלי המוח". יש המקשרים תבניות אלו ליצירת שיתוף פעולה בין תאי עצב המרוחקים זה מזה, על-ידי סנכרון קצב הפעילות שלהם.



Roadrunner. שבר את המחסום של פטה-פלופט אחד
LeRoy N. Sanchez, Records Management, Media Services and Operations

עבור רובנו, מהירותו שוברת-השיאים של Roadrunner היא מדהימה. עבור חוקרי מוח, היא כמעט מספיקה: היא מתחילה להתקרב למהירות הנדרשת כדי לדמות את התהליכים המתרחשים במוח האנושי.

אחת התוכנות הראשונות שהופעלו על Roadrunner היא הדמיה של חלק מהמוח האנושי המוקדש לשלבים הראשונים של עיבוד מידע חזותי. בחלק שאת פעולתו מחקה המחשב יש יותר מאלף מיליוני תאי עצב, שהם כמאית מהמספר הכולל של תאי עצב במוח האדם. תאים אלה מחוברים זה לזה בכמה מיליונים של מיליוני צמתים עצביים (סינפסות, נקודות מפגש בין תאי עצב) המשמשים להעברת מידע בין התאים.

עד עתה הספיקו החוקרים רק לוודא כי התוכנה פועלת כנדרש, והם צופים כי יוכלו לדמות את הפעילות המלאה של קליפת מוח זו המוקדשת לראייה, ב"זמן אמיתי" – כלומר שלמחשב תידרש עשירית שנייה כדי לחשב את כל הפעולות שמבצעים אלף מיליוני תאי העצב האנושיים בעשירית שנייה. מוקדם עדיין לצפות מה ילמדו החוקרים מהדמיה זו, אך ברור כי הם מקווים להשיג את המטרה הנכספת של יצירת





אימג'בנק / GettyImages



הרגשית עמו.

בניסוי השני השתתפו 152 סטודנטים. הניסוי היה זהה לניסוי הראשון, למעט זאת שהפעם התבוננות מנקודת המבט של הזולת ואמפתיה לא נמדדו כתכונות אישיות, אלא תופעלו באופן הזה: הקונים חולקו לשלוש קבוצות. למשתתפי הקבוצה הראשונה – קבוצת הביקורת – נאמר פשוט להתמקד בתפקיד שלהם. משתתפי הקבוצה השנייה – קבוצת האמפתיה – התבקשו לנסות ולהבין מהם הרגשות שחווה המוכר; הם התבקשו לדמיין מה הם עצמם היו מרגישים לו היו הם המוכרים של תחנת הדלק. לבסוף, משתתפי הקבוצה השלישית – קבוצת אימוץ נקודת המבט – התבקשו לנסות להבין את מחשבותיו ומניעיו של המוכר מתוך נקודת מבטו. הם התבקשו לנסות להבין מה מניע אותו למכור ומהם מניעיו. עוד התבקשו לדמיין, מה הם עצמם היו חושבים לו הם היו המוכרים של תחנת הדלק.

בסיום המשא ומתן, דירג כל משתתף את שביעות רצונו מהיחס של הצד האחר אליו במהלך המשא ומתן.

מניתוח תוצאות המחקר עולה, כי מבין הזוגות שניהלו

ששולם עבור תחנת הדלק לא עלה על המחיר המרבי של הקונה, והעסקה כללה את מילוי של תנאי נוסף אחד לפחות, למשל, העסקת המוכר עם שובו מהשיט.

שבוע לאחר ניהול המשא ומתן, השיבו המשתתפים על שאלון המודד תכונות אישיות, וביניהן הנטייה להתבונן מנקודת המבט של הזולת ("אני מאמין שיש שני צדדים לכל שאלה, ואני משתדל להתבונן בשניהם") והיכולת לאמפתיה ("אני משתתף בצערם של אחרים כשיש להם בעיות").

מתוצאות המחקר עולה, שכשבעים אחוזים מהזוגות הגיעו לפתרון מוצלח של המשא ומתן. עוד מתברר כי הנטייה של הקונה להתבונן מנקודת המבט של הזולת ניבאה אם הזוג ישלים את העסקה. כלומר, יכולת זו של הקונה הגדילה את הסיכוי להגיע לפתרון יצירתי (שאינו כולל רק מחיר), שיהיה מוסכם על שני הצדדים. לעומת זאת לא נמצאה השפעה של היכולת לאמפתיה, אם של הקונה ואם של המוכר, על השלמת העסקה.

מכאן שהיכולת של הקונה להבין את מניעיו ומטרותיו של הזולת יעילה יותר בניהול משא ומתן מאשר ההזדהות



משא ומתן: הבנת הזולת או אמפתיה עמו?

ומתן מורכב? האם תוצאות המשא ומתן יהיו אפקטיביות יותר מבחינתו אם יצליח לחוש אמפתיה עם הזולת, כלומר להזדהות עמו רגשית, או שמא המשא ומתן יהיה יעיל יותר אם יצליח לראות את נקודת המבט של הזולת, כלומר לנסות להבין באופן רציונלי את מחשבותיו ומניעיו?

בניסוי הראשון השתתפו 70 סטודנטים, אשר חולקו באופן אקראי ל-35 זוגות. סטודנט אחד בכל זוג שיחק תפקיד של מוכר, והאחר – של קונה. השניים ניהלו משא ומתן על מכירתה של תחנת דלק. כל סטודנט קיבל שבוע מראש את תיאור התפקיד שהוטל עליו לגלם, וביום המיועד לכך ניהלו הסטודנטים משא ומתן במשך חמישים דקות. החוקרים בנו את משחק התפקידים כך שהמחיר המרבי שהותר לקונה לשלם על תחנת הדלק היה נמוך ממחיר המינימום שהמוכר היה מוכן להסכים לו. ואולם, לצדדים היו עוד מטרות, שהלמו אלו את אלו: הקונה היה מעוניין לשכור מנהל שינהל את תחנת הדלק לאחר הרכישה; ואילו המוכר היה זקוק לכסף למימון שיט, וכן היה עליו למצוא עבודה לכשיחזור מהשיט. מידע זה על מניעי הזולת לא היה ידוע מראש לכל אחד מן הצדדים, ורק בעקבות הידברות זה עם זה יכלו לגלותו. תגלית זו היתה עשויה להביא לפתרון מוצלח של המשא ומתן עבור שני הצדדים: השניים יוכלו להסכים על מחיר שהוא מתחת למחיר המינימום של המוכר, בתוספת תנאי, שהקונה יעסיק את המוכר בעתיד כמנהל התחנה. פתרון מוצלח של המשא ומתן הוגדר ככזה שבו המחיר

ניהול משא ומתן הוא חלק בלתי נפרד מחיינו, בין שמדובר בהתמקחות על מחירה של סחורה בשוק, בשכירת דירה או בהסכם שלום. ניהול מוצלח של משא ומתן דורש מאיתנו להבין את הזולת שעמו אנו מתדיינים. אך מה פירושה של הבנה זו? האם זוהי הבנה רציונלית של מניעיו ומטרותיו של הזולת, או שמא זוהי הזדהות רגשית עמו? על שאלה זו מנסים לענות אדם גלינסקי (Galinsky), ויליאם מדוקס (Maddux), דברה גילין (Gilin) וג'ודית וייט (White), במאמר שראה אור בכתב-העת *Psychological Science*. הבנת הזולת דורשת שתי תכונות נפרדות: האחת היא היכולת הקוגניטיבית לראות את הדברים מנקודת המבט של הזולת. יכולת זו מכונה perspective taking, והיא מאפשרת לאדם לחזות מראש את ההתנהגות ואת התגובות של הזולת. האחרת היא אמפתיה (empathy), תגובה רגשית המאפשרת הזדהות רגשית עם הזולת¹. במחקרים קודמים נמצא כי אנשים בעלי רמות גבוהות של יכולת להתבונן מנקודת המבט של הזולת הם אלה המסוגלים גם להבין תפישות עולם שונות משלהם, ולצאת מתוך ה"קופסה" המחשבתית של עצמם בעת פתרון בעיות. עוד נמצא במחקרים קודמים, כי אנשים בעלי יכולת אמפתיה גבוהה הם אלה שיעדיפו שיתוף פעולה עם הזולת על פני תחרות עמו, גם כשניתן להם מידע, שהזולת שיקר בעבר על אודות כוונתו לשתף פעולה. במחקר הנוכחי ניסו גלינסקי ועמיתיו להשיב על שאלה זו: מהי הגישה היעילה ביותר עבור הפרט המנהל משא

1. בספרות המקצועית מופיעות הגדרות נוספות לאמפתיה, אך נגדיר אותה כאן כפי שהוגדרה במאמר גלינסקי ועמיתיו.

גליליאו

כתב עת למדע ומחשבה



מבצע היכרות מיוחד מצטרפים לכתב העת גליליאו למדע

1 – 75 ש"ח בלבד

מחפשים להרחיב ולהעשיר את הדעת? אוהבים לדעת יותר על הכל?



בואו לקרוא חדשות מדע, סקירות של מחקרים חדשים ומאמרים מרתקים בתחומי הביולוגיה, הפיזיקה, חקר החלל, פרדוקסים לוגיים ועוד.



להזמנת מנוי חייגו: **155-505-1599** 24 שעות ביממה

* אין כפל מבצעים * ט.ל.ח. * התמונות להמחשה בלבד * המבצע למצטרפים למינוי ריבועוני (3 חודשים) במחיר מיוחד של 75 ש"ח בלבד !!!

www.ifeel.co.il

העשויות להלום זו את זו בחלק מן התחומים ולהיבדל באופן משמעותי באחרים. שני הצדדים יכולים למקסם את תוצאות המשא ומתן עבור עצמם אם יוותרו לצד האחר בתחומים הנמצאים בעדיפות נמוכה עבורם, בתמורה לרווחים בתחומים הנמצאים עבורם בעדיפות עליונה. במחקרים קודמים, טקטיקה זו נמצאה כעדיפה עבור כל צד בהשוואה לטקטיקות אחרות, כמו התפשרות "באמצע הדרך" בין הצדדים בכל תחום.

בדומה לניסוי השני, בניסוי שלישי זה חולקו המראיינים לשלוש קבוצות: ביקורת, אמפתיה ואימוץ נקודת מבט, וקיבלו הוראות הזהות לאלו של משתתפי הניסוי השני.

מניתוח תוצאות הניסוי עולה כי מראיינים שהתבקשו להתבונן מנקודת המבט של המועמד הביאו לרווחים הגבוהים ביותר הן עבור עצמם והן עבור הזוג במשותף. לעומת זאת, הזדהות של המראיינים עם המועמד הביאה לרווחים הנמוכים ביותר עבור עצמם.

לסיכום, מתוצאות שלושת הניסויים עולה כי בני מזל הם אלה שניחנו בתכונות האישיות של התבוננות מנקודת המבט של הזולת. נוסף על כך, אימוץ מכוון של נקודת המבט של הזולת הוא טקטיקה יעילה בניהול משא ומתן, העדיפה על פני הזדהות רגשית עמו. יתרה מזו, לא זו בלבד שאמפתיה לא נמצאה יעילה (ניסויים 1 ו-2), אלא שלעתים היא אף היוותה מכשול במקסום הרווחים של היחיד (ניסוי 3). ואולם, חשוב לזכור כי הבעת אמפתיה עם הזולת הביאה לרמות גבוהות יותר של שביעות רצון של הזולת. כך שייתכן שבסוגי משא ומתן שלא נבחנו כאן, כמו במצבי סכסוך שבהם הצדדים מגיעים לשולחן המשא ומתן עם משקעים שליליים עמוקים, כדאי, כצעד ראשון, להגדיל את שביעות הרצון של הצדדים בתהליך המשא ומתן על-ידי הבעת אמפתיה. ■

ד"ר מרים דיסון ברקוביץ היא פסיכולוגית ויועצת ארגונית ושייוקית.

משא ומתן באופן שהקונה התבקש להתבונן בתהליך מנקודת מבטו של המוכר, זוגות רבים יותר הגיעו לעסקה מוצלחת בהשוואה לזוגות שבהם הקונה היה מקבוצת הביקורת. לעומת זאת, לזוגות שבהם הקונים התבקשו לחוש אמפתיה עם המוכרים לא היתה הצלחה רבה יותר במימוש העסקה בהשוואה לזוגות שבהם הקונים השתייכו לקבוצת הביקורת.

עוד התברר, כי מוכרים שניהלו משא ומתן עם קונים מקבוצת האמפתיה דיווחו על הרמות הגבוהות ביותר של שביעות רצון, ואילו מוכרים שניהלו משא ומתן עם קונים מקבוצת הביקורת דיווחו על הרמות הנמוכות ביותר של שביעות רצון. מוכרים שניהלו משא ומתן עם קונים מקבוצת אימוץ נקודת המבט נמצאו בתווך. נמצא, אפוא, כי אף שלאמפתיה יש השלכות רגשיות ישירות על תחושותיו של הצד האחר, היא לא הביאה לחתימה על עסקאות שיענו על צורכי שני הצדדים.

בניסוי השלישי, שבו השתתפו 146 סטודנטים, התבקשו הצדדים לנהל משא ומתן בין מועמד לעבודה לבין מראיין. הצדדים ניהלו משא ומתן על אודות שמונה נושאים הקשורים לשכירת המועמד (למשל, בונוסים או חופשות), כאשר כל צד קיבל רשימה של סדרי עדיפויות עבורו. לכל תחום הוקצתה מכסת נקודות מרבית, אשר כל צד יוכל לצבור אם הצד האחר יקבל את תנאיו במשא ומתן. נמדדה צבירת הנקודות האישית של כל יחיד בסיום המשא ומתן, וכן צבירת הנקודות המשותפת של הזוג. הניקוד של כל נושא הושפע מחשיבותו בסדר העדיפויות של כל צד. כך, למשל, חופשה היתה שווה 4,000 נקודות עבור המועמד, אך רק 1,600 עבור המראיין. לעומת זאת, בונוס היה שווה 4,000 נקודות עבור המראיין, אך רק 1,600 עבור המועמד. עבור חלק מהנושאים סדר העדיפויות – וכך גם הניקוד – היה זהה עבור שני בני הזוג. בסך-הכל הזוג היה יכול לצבור 13,200 נקודות.

משחק תפקידים זה משקף מצב רווח, שבו המשא ומתן נפרש על פני תחומים רבים, ובכל אחד מהם לכל צד יש העדפות שונות,

בין הפותרים יוגרל מנוי לירחון
"דרך האוכל". בירחון תוכלו
למצוא מתכונים נפלאים,
מאכלי עדות, טיפים ועצות,
ראיונות עם שפים מבילים,
קישוטי מזון, אלכוהול ועוד.



את הפתרונות יש לשלוח
ל"מערכת גליליון",
SBC הוצאה לאור,
רח' שפע טל 8
תל-אביב, 67013
או ל: shlomit@sbc.co.il
ולציינ בשורת הנושא
"למדור קפיצת ראש".
נא לציינ שם מלא, כתובת וטלפון.

גם פתרונות לחלק מהשאלות
בלבד ישתפו בהגדלה.

במשולשים ישרי-זווית מתקיים משפט פיתגורס, שלפיו סכום ריבועי הניצבים שווה לריבוע היתר.
לא קל למצוא משולשים פיתגוראיים. המשולש הידוע ביותר מסוג זה הוא המשולש 3,4,5, שכן
 $3^2+4^2=5^2$.

נסו למצוא בעצמכם משולשים פיתגוראיים נוספים (שאינם מכפלה של המשולש 3, 4, 5). מן
הסתם, מלאכתכם לא היתה קלה, אך בעזרת ארבעה מספרים רצופים מסדרת פיבונצ'י ואלגוריתם
קצר, אפשר בקלות למצוא עוד משולשים כאלו!
ניקה לדוגמה את מספרי פיבונצ'י 1, 2, 3, 5. נסמן את השניים הראשונים a ו-b. מכיוון שהם
מסדרת פיבונצ'י, המספר השלישי יסומן a+b והרביעי a+2b או b+(a+b).

a	b	a+b	a+2b
1	2	3	5

קעת ניצור משולש פיתגוראי לפי הצעדים האלה:

1. כפלו את שני המספרים האמצעיים זה בזה (בדוגמה שלנו, 2 כפול 3 שווה 6).
 2. כפלו את התוצאה ב-2 (בדוגמה שלנו, 6 כפול 2 שווה 12) - זהו אחד הניצבים של המשולש שאותו
אנו יוצרים.
 3. כפלו את שני המספרים הקיצוניים זה בזה (בדוגמה שלנו, 1 כפול 5 שווה 5) - זהו הניצב השני של
המשולש שאותו אנו יוצרים.
 4. את היתר מוצאים על-ידי חיבור הריבועים של שני המספרים האמצעיים זה לזה (בדוגמה שלנו: 2
בריבוע = 4, 3 בריבוע = 9, והסכום שלהם הוא 13). זהו היתר של המשולש שלנו.
כך קיבלנו את המשולש הפיתגוראי: 5, 6, 13. בעזרת אלגוריתם זה אפשר למצוא משולשים
פיתגוראיים רבים נוספים. אלגוריתם זה פועל גם עם סדרה פיבונצ'ית כללית, וכך אפשר להוכיח
שהוא מוצא את כל המשולשים הפיתגוראיים האפשריים (יש אינסוף כאלה...).
- מתמטיקאים רבים התעניינו בתכונותיה המופלאות של סדרת פיבונצ'י, ושלל שאלות מעניינות
החלו להישאל. אחת השאלות היא, האם קיימת נוסחה לחישוב מספר פיבונצ'י במיקום כלשהו
בסדרה.
- אחד המתמטיקאים הראשונים שהציעו נוסחה כזאת היה המתמטיקאי הצרפתי אברהם דה-
מואברה (De Moivre):

$$\text{Fib}(n) = \frac{1}{\sqrt{5}} \left[\left(\frac{1+\sqrt{5}}{2} \right)^n - \left(\frac{1-\sqrt{5}}{2} \right)^n \right]$$

אף שדה-מואברה הוא שמצא נוסחה זו לראשונה, היא נקראת על שם מתמטיקאי אחר שגילה
אותה מאוחר יותר - נוסחת בינת (Binet).
המספר $\frac{1+\sqrt{5}}{2}$ המופיע בנוסחת בינת הוא מספר אי-רציונלי מיוחד, המכונה מספר הזהב, ונהוג
לסמנו באות היוונית פי (פה רפה), שסימנה f. המספר השני, $\frac{1-\sqrt{5}}{2}$, שווה ל- $-\frac{1}{\phi}$.
הראינו כאן רק על קצה המזלג מתכונותיה המופלאות של סדרת פיבונצ'י. המתעניינים יוכלו
למצוא אוצר של ממש באתרו של המתמטיקאי האנגלי רון נוט (Knott), המוקדש למספרי פיבונצ'י:
<http://www.mcs.surrey.ac.uk/Personal/R.Knott/Fibonacci>

לאונרדו פיבונצ'י

1 1 2 3 5 8 13 21 34 55 89 144 233 ...
פשוטות הסדרה ותכונותיה המופלאות הותירו רושם עד על פיבונצ'י ועל דורות של מתמטיקאים שבאו אחריו.

סדרת פיבונצ'י מוגדרת כך: $F_n = F_{n-1} + F_{n-2}$

כאשר F_n הוא האיבר במקום ה- n בסדרה, והוא מתקבל על-ידי הוספת האיבר במקום ה- $n-1$ לאיבר במקום ה- $n-2$. שני האיברים הראשונים אינם יכולים להיקבע לפי נוסחה זו, אך נהוג ששני איברים אלו הם 0 ו-1. כאשר האיברים הראשונים הם מספרים אחרים, הסדרה מכונה סדרה דמוית-פיבונצ'י או סדרה פיבונצ'ית כללית. סדרה אחת כזאת היא הסדרה המתחילה באיברים: 2 ו-1. סדרה זו מכונה "סדרת לוקאס", על שם המתמטיקאי הצרפתי אדוארד לוקאס (Lucas) בן המאה ה-19. סדרת לוקאס נראית כך: 2, 1, 3, 4, 7, 11, ... ויש לה קשר הדוק לסדרת פיבונצ'י.

לוקאס הוא שהחל לקרוא לסדרה של פיבונצ'י בשם סדרת פיבונצ'י, אף שפיבונצ'י עצמו לא טען ל"זכויות יוצרים" על הסדרה. ואכן, מתמטיקאים הודים הכירו את הסדרה הרבה לפני זמנו של פיבונצ'י. ככל הנראה, פיבונצ'י, אשר הכיר היטב את המתמטיקה ההודית, גילה את הסדרה ומצא לה שימושים נוספים.

מסתבר שסדרת פיבונצ'י מרבה להופיע בסיטואציות בלתי צפויות. למשל, ישנה טענה מבוססת למדי שמספרים מתוך סדרת פיבונצ'י נפוצים מאוד בטבע. אחת הדוגמאות לכך היא תפוחת החמנייה, שלה 34 פרחים לשוניים היקפיים. בפרחים רבים, מספר עלי הכותרת הוא מספר מסדרת פיבונצ'י. הסברים מסוגים שונים ניתנו לתופעה זו, ורובם קשורים למספר מתמטי מיוחד הנקרא "יחס הזהב", שעליו נרחיב באחד המדורים הבאים.

פתרון של לא-מעט חידות קומבינטוריות מתקבל תוך שימוש במספרי פיבונצ'י. דוגמה מובהקת היא החידה הזאת: נניח שבידינו רק שטרות של 100 ו-200 שקלים, ואנחנו רוצים לדעת בכמה דרכים אפשר ליצור בעזרתם סכומים שהם כפולות של 100 שקלים (לדוגמה: 100 שקלים אפשר ליצור בדרך אחת בלבד, ו-200 שקלים אפשר ליצור בשתי דרכים - 100+100 או 200). התשובה המתקבלת היא הסדרה הזאת: 1, 2, 3, 5, 8, ...

סדרת פיבונצ'י יכולה במקרים מסוימים להיות אסטרטגיה מנצחת במשחק דמוי "נים" (למשחק זה, שהוא אבטיפוס בתורת המשחקים, נקדיש את אחד המדורים הבאים) ובמשחקים אחרים. אחד השימושים היותר "מתמטיים" של סדרת פיבונצ'י הוא בחישוב משולשים פיתגוראיים. משולש פיתגוראי הוא משולש ישר-זווית אשר אורכי צלעותיו הם כולם מספרים שלמים.

מעטים הם המתמטיקאים שהשפעתם היתה כה גדולה, עד שאין כמעט אדם שלא נתקל בשמותיהם במהלך חייו. מעטים עוד יותר הם המתמטיקאים שזכו בכבוד זה בעקבות תגלית או הברקה כה פשוטה, עד שאפילו ילד בכיתה א' יכול להבין אותה!

כזה הוא המתמטיקאי האיטלקי הידוע לאונרדו פיבונצ'י (Fibonacci). פיבונצ'י נולד בעיר פיזה בשנת 1175. תרומתו העיקרית למתמטיקה היא בהשפעתו על המעבר משיטת הספרות הרומיות לשיטה ההודית-ערבית הנהוגה היום. שמו של פיבונצ'י היה מפורסם בשעתו עד כדי כך, שהקיסר פרידריך השני ערך בשעת ביקורו בפיזה תחרות חידות פומבית כדי לעמוד על כישורנותו.

בין השאר הוא חד לפיבונצ'י את החידה הזאת:

"מהו המספר שריבועו יישאר ריבוע גם לאחר שיוסיפו לו חמש או יגרעו ממנו חמש?" (אתם מוזמנים לנסות את כוחכם בפתרון החידה בהמשך...).

פיבונצ'י, שכתב חמישה ספרי מתמטיקה, התעניין בעיקר בתורת המספרים. באחד מספריו מופיעה חידה העוסקת בהתרבות של ארנבות:

לתוך כלוב סגור מכניסים זוג ארנבות בוגרות. בסוף כל חודש ממליט הזוג חדש (זכר ונקבה). כל זוג גורי ארנבות ממליט, החל מהחודש השני לחייו, זוג ארנבות חדש בסוף כל חודש. אין תמותה של ארנבות. כמה זוגות ארנבות יהיו בכלוב בתחילת כל חודש?

אם נהרהר בנתונים, ניווכח שבתחילת החודש הראשון יהיה זוג אחד של ארנבות בכלוב, בתחילת החודש השני יהיו שני זוגות (הזוג המקורי המליט זוג אחד בסוף החודש הראשון), בתחילת החודש השלישי יהיו שלושה זוגות (הזוג המקורי המליט זוג נוסף בסוף החודש השני והזוג שנולד טרם המליט), בתחילת החודש הרביעי יהיו חמישה זוגות וכן הלאה.

אם נרשום את מספר זוגות הארנבות בכלוב כסדרה של מספרים, נקבל את הסדרה הזאת:

1 1 2 3 5 8 13 21 34 55 89 144 233 ...
פיבונצ'י העיר בספרו כי זוהי סדרה מיוחדת, מכיוון שכל מספר בסדרה, החל מהמספר השלישי, הוא סכום של שני המספרים הקודמים לו בסדרה.

פיבונצ'י המשיך וחישב את מספר זוגות הארנבות הנולדים בכל חודש. להפתעתו קיבל פיבונצ'י כמעט אותה הסדרה (ההבדל הוא רק באיבר הראשון):



הקרנת הקולנוע

הראשונה היתה בשנת 1895
בבית קפה בפאריז, כאשר
האחים לומייר הציגו סרט קצר
על כניסתה של רכבת לתחנה

גרוביג וביצור

ספרים • סרטים • מוסיקה • תערוכות • טיולים

ifeel
www.ifeel.co.il

[טריוויה מדעית]

1. מה מכיל יותר סוכר – פלפל אדום חי או משקל שווה של תות שדה?
2. איזה בעל-חיים מוסיף חדרים לביתו במהלך חייו?
3. מהן שלוש הצורות האופייניות של טביעות אצבע?

ובינתיים, אנו מציעים לכם לנסות ולפתור את השאלות שלהלן, מהקל אל הכבד...

1. אילו מספרי פיבונצ'י נחוצים כדי ליצור באותו אופן שהראינו את המשולש הפיתגוראי שצלעותיו 30, 16, 34?



2. נתון מספר פיבונצ'י כלשהו F_n . נסו למצוא כלל שעל פיו אפשר למצוא את מיקומן של הכפולות של F בתוך הרשימה הסדורה של מספרי פיבונצ'י.



רמז: היעזרו בדוגמאות. למשל: באילו מקומות ברשימה הסדורה של מספרי פיבונצ'י נמצאות הכפולות של המספר (הפיבונצ'י) $F=8$?

3. פתרו את החידה שהציג הקיסר פרידריך השני לפיבונצ'י: מהו המספר שריבועו יישאר ריבוע גם לאחר שיוסיפו לו חמש או יגרעו ממנו חמש?

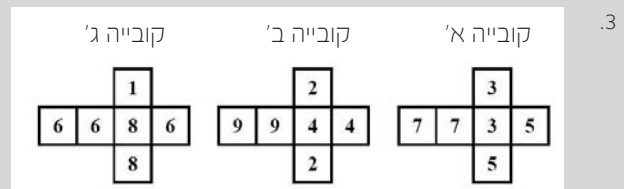
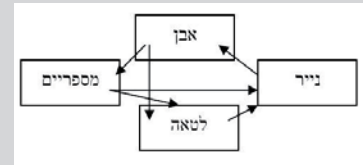


פתרונות גיליון 119

[חידות מתמטיות]

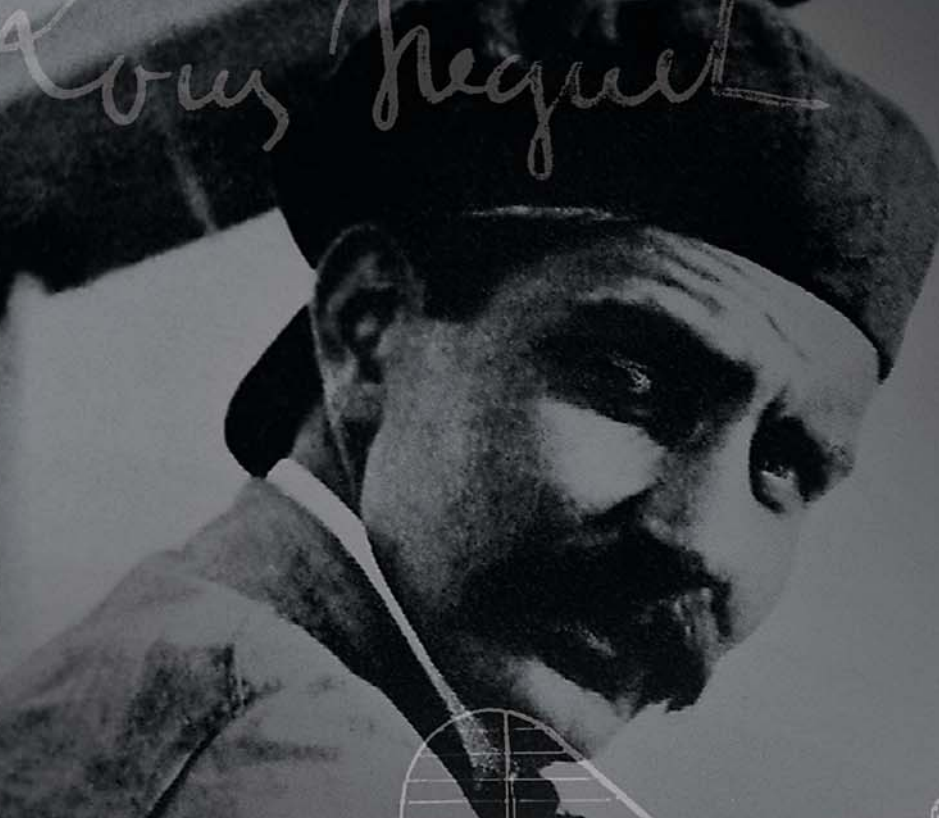
1. אין טעם במשחק "אבן, נייר ומספריים" שבו מספר זוגי של גופים, מפני שאז אין סימטריות במשחק, כלומר מספר החצים הפונים אל גורם יהיה שונה ממספר החצים הפונים מהגורם לגורם אחר. במצב כזה לא יהיה לשחקן כדאי לשחק בגורמים המנוצחים יותר מאשר מנצחים.

2. נסמן: א=אבן, נ=נייר, מ=מספריים, ל=לטאה, ס=ספוק.
ישנם בסך-הכל 12 מעגלים: 2 מעגלים באורך חמש (אלסמן, אמלנס), 5 מעגלים באורך 4 (אמלס, אמלנ, אמנס, אלנס, אלנ, אמנ, סמנ, סמל).



[טריוויה מדעית]

1. החומר האחראי לחריפותו של פלפל חריף הוא קפסאיצין (Capsaicin), תרכובת צורבת, חסרת צבע וריח, המיוצרת בסוגים שונים של פלפלים.
2. בחדק הפיל מעל 40,000 "חידות שריר" (יחידות מוטוריות)! החדק של הפיל הוא כל-כך עדין בתגובותיו, שהוא יכול להרים בעזרתו גם חפצים קטנים ביותר, כמו בוטנים. בקצה החדק של הפיל האפריקני ישנן שתי "בליטות" דמויות אצבעות, בעוד שלפיל האסייתי רק "בליטה" אחת דמוית-אצבע.
3. על פני השמש ניתן למדוד טמפרטורות שונות, ולכן שאלה זו אינה לגמרי הוגנת. טווח הטמפרטורות הנמדדות הוא בין 4,000 ל-6,000 מעלות צלזיוס בקירוב. הטמפרטורות הנמוכות יותר נמדדות באזורים הנראים כנקודות שחורות על פני השמש, המכונים "כתמי שמש" (גלילאו גילה ופרסם את קיומם). בליבת השמש הטמפרטורות גבוהות בהרבה, ומגיעות עד ל-16 מיליון מעלות צלזיוס בקירוב.




Breguet
 Depuis 1775

**Louis Breguet,
 pioneer in aeronautics,
 equipped his planes with
 Breguet chronographs.**



Type XXI Collection - Fly-Back Chronograph and 24-Hour Time Display - 3810BR

Impress

רשת חנויות לשעוני יוקרה

גרנד קניון | 04-8221178 | קניון | 04-8764137 | קניון עזריאלי | 03-6967435
 קניון רמת אביב | 03-6411997 | אילת קניון מול הים | 08-6342243
 פתח תקווה רח' אימבר 7 | 03-9297000

מרכז שירות ארצי 03-9297008