

# חושך בצהרי יום

ליקוי חמה מלא הוא בלא ספק האירוע האסטרונומי המרהיב ביותר שיחוו רוב האנשים בימי חייהם. לקראת ה-29 במרץ 2006 יפקדו את טורקיה אשר בקרבתנו רבבות אנשים, מאירופה ומהעולם כולו, בכדי לצפות בליקוי חמה מלא



## מאת: עפר ירון

ממרחקו של הירח (מרחקה הממוצע של השמש מכדור-הארץ – 149.6 מיליון ק"מ; מרחקו הממוצע של הירח – 384,400 ק"מ). ליקוי חמה מתרחש כאשר הירח עובר בדיוק בין כדור-הארץ והשמש, וצלו של הירח נופל על פני כדור-הארץ. זהו מצב שבו הירח הוא במולד ("ירח חדש", תחילת החודש העברי או סופו).

לצל הירח שני חלקים (איור 1): פנומברה (penumbra) – צל חלקי חיצוני: ליקויים חלקיים נראים מאזור זה; ואומברה (umbra) – חרוט צל מלא פנימי: ליקויים מלאים נראים מאזור זה. מכיוון שמישור הסיבוב של הירח סביב כדור-הארץ נטוי בזווית של כ-5.14 מעלות למישור המילקה (ecliptic), מישור סיבוב כדור-הארץ סביב השמש), ליקויים אינם מתרחשים

"והיה ביום ההוא נאם אדני ה' והבאתי השמש בצהרים והחשכתי לארץ ביום אור" (עמוס ח' 9)<sup>1</sup>

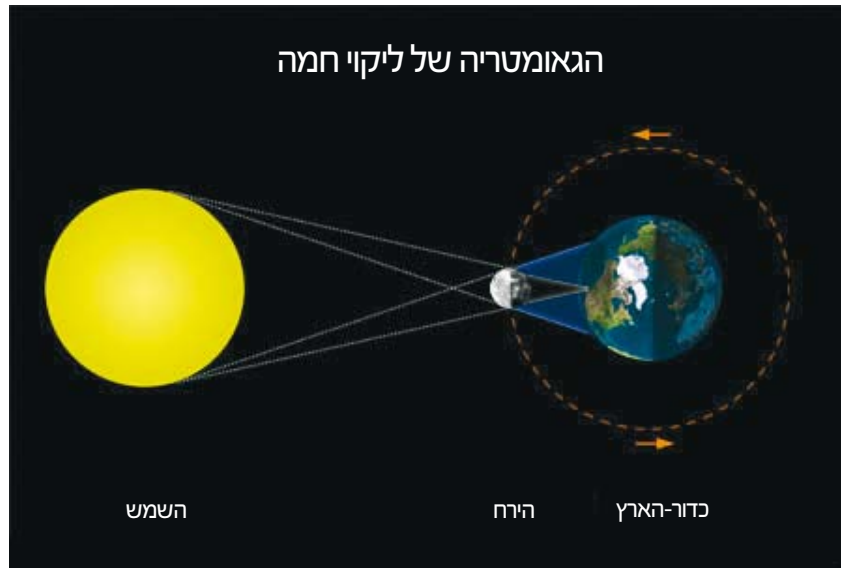
ליקוי חמה מלא הוא אחד האירועים האסטרונומיים מרהיבי העין והמלהיבים ביותר, ובמיוחד אם הוא מתרחש ביום בהיר וסמוך לצהרי היום. מרצועה צרה על פני כדור-הארץ, מסתיר הירח הסתרה מלאה את השמש; עלטה יורדת, ועטרת השמש מתגלה במלוא הדרה. הגודל הזוויתי<sup>2</sup> של הירח והשמש, כפי שהוא נראה לצופה מכדור-הארץ, הוא דומה מאוד; שניהם פורסים זווית של חצי המעלה לערך. קוטר השמש (~1.392 מיליון ק"מ) גדול מקוטר הירח (~3,476 ק"מ) פי 400 לערך, אך באופן מקרי לחלוטין, השמש מרוחקת מאיתנו פי 400 לערך

1 ציטוט זה מספר עמוס, שהיה נביא מיהודה שפעל בממלכת ישראל הצפונית במאה ה-8 לפנה"ס, מתייחס כנראה לליקוי המלא של ה-15 ביוני, 763 לפנה"ס (לפי ציון התאריכים הנהוג כיום, כמובן), הליקוי ה-39/72 בסדרת סארוס 44.

2 גודל זוויתי הוא הזווית שבה נראה גוף (מקצה אחד שלו לקצה האחר) ביחס לצופה. באסטרונומיה נעשה שימוש רב בציון גדלים בצורה זו, במקום לציין את הגודל האמיתי של הגוף (במונחים של קוטר, למשל, אז חייבים להביא בחשבון את המרחק אל הגוף).



## הגאומטריה של ליקוי חמה



איור 1: גאומטריה של ליקוי חמה מלא (מתוך: Fred Espenak, www.MrEclipse.com)

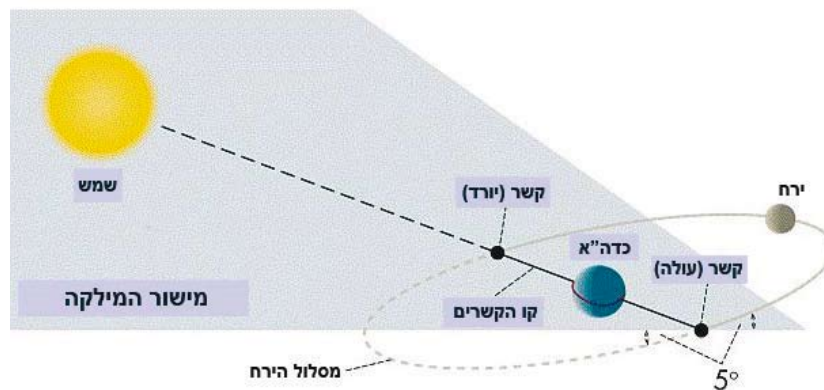
סוג שהוא). אגב, ליקוי ירח, כלומר מצב שבו כדור-הארץ נמצא בדיוק בין הירח והשמש, והירח נכנס (בהקפתו את כדור-הארץ) אל תוך חרוט הצל שמטיל כדור-הארץ, יתרחש כשבועיים ימים לפני ליקוי חמה או אחריו. זאת מכיוון שאם אנו מצויים בנקודת קשר כלשהי (כלומר, בנקודת חיתוך של שני מישורי הסיבוב), שבה מתרחש ליקוי חמה או ליקוי ירח, ישנה סבירות גבוהה שגם בקשר הבא, שאליו יגיע הירח כעבור שבועיים, עדיין נהיה במצב מתאים לליקוי (מהסוג האחר), כלומר מצב שבו השמש, כדור-הארץ והירח מיושרים בקו אחד. בתיבת המונחים מופיעות הגדרות לסוגים שונים של "חודשי" ירח. כל ההגדרות קשורות לאופן תנועת הירח סביב כדור-הארץ ביחס לנקודות ייחוס ומאפיינים שונים, וכולן תורמות להבנת ליקויים: הגיאומטריה של המערכת והמחזוריות והתדירויות שלה.

עובדה ידועה היא, עוד מתקופת הבבלים, שהקשרים רוכשים מחדש את מיקומם המקורי לאחר 18 שנים ו-11.3 ימים (לפעמים נוהגים לציין 10 ימים ושליש היום, תלוי במספר השנים המעוברות בתקופה) – זהו מחזור ה"סארוס". מחזור זה אורך 223 חודשים סינודיים  $(223 \approx (11.3 + 18 \times 19.7529))$ , תקופה המקבילה לכ-19 שנות ליקויים (6585.78 ימים =  $19 \times 346.62$ ). לפיכך, ליקויים חוזרים על עצמם במחזורים אלו ויוצרים סדרות. כל שני ליקויים המופרדים במחזור אחד חולקים גיאומטריה דומה. הם קורים באותו הקשר, כאשר הירח כמעט באותו מרחק מכדור-הארץ ובאותו זמן בשנה. עם זאת, החלק ה-0.32 הנוסף של היום במחזור הסארוס (6585.32 ימים =  $223 \times 29.5306$ ) גורם לתזוזה מערבה של ליקויים עוקבים בכשליש מהיקף כדור-הארץ ( $\sim 120^\circ$ ), כלומר גם שלישי היממה. מכאן נובע שסדרת סארוס חוזרת לאותו האזור הגאוגרפי מדי 3 מחזורים ("סארוס משולש", שמשכו בדיוק 54 שנים ו-34 ימים). הליקויים גם זזים מעלות

מדי חודש, אלא רק כאשר מופע של ירח חדש מתלכד עם קשר (node), המוגדר כנקודת חיתוך בין שני מישורי הסיבוב (ישנם שני קשרים: "קשר עולה" – כאשר הגוף הסובב עולה מדרום לצפון, ו"קשר יורד" – מעבר מצפון לדרום. ראו איור 2).

חפיפה זו אינה חייבת להיות מדויקת לחלוטין, כלומר אין צורך שהירח יהיה בדיוק בנקודת הקשר עצמה כדי שצלו או חלק מצלו ייפול על פני כדור-הארץ. כיוון שכך, ליקוי יכול להתרחש עד 18.75 ימים לפני או אחרי המצב שבו כדור-הארץ, הירח והשמש נמצאים בדיוק על קו אחד (מצב הנקרא התקבצות, alignment). עובדה זו יוצרת את מה שקרוי "עונת הליקויים", שבה יכולים להתרחש עד שני ליקויים, מכיוון שהחודש הסינודי, שמשכו 29.53 ימים (חודש סינודי, synodic, מוגדר כפרק הזמן שבין ירחים חדשים עוקבים, היינו ממולד למולד), קצר מעונת הליקוי שאורכה 37.5 ימים. קו הקשרים – זהו קו החיתוך בין המישורים – נע בהדרגה מערבה לאורך המילקה (עם כיוון השעון ממבט-על), ומשלים הקפה שלמה ב-18.6 שנים (כלומר, מסתובב בשיעור של כ-19.4 מעלות בשנה), כך שהירח מגיע לקשר המנוגד פחות משישה חודשים אחר-כך, וההתקבצות עם הקשר המקורי מתרחשת לאחר 346.62 ימים. תקופה זו מוגדרת "שנת הליקויים". בשנה אחת יכולים להתרחש ארבעה ליקויי חמה, אך מכיוון שהשנה הקלנדרית ארוכה משנת הליקויים, ייתכן שבאותה שנה קלנדרית יתרחש ליקוי חמישי. זהו מצב נדיר מאוד, ואם הוא מתקיים, יתרחש הליקוי החמישי בינואר או בדצמבר. הפעם הבאה שבה יתרחשו חמישה ליקויים בשנה אחת תהיה בשנת 2206. ומה באשר למספר הליקויים המינימלי! לפחות שני ליקויי חמה מכל סוג שהוא חייבים להתרחש בכל שנה (וזהו גם המצב השכיח ביותר – שני ליקויים בשנה). לסיכום, בשנה קלנדרית אחת יתרחשו בין שניים לחמישה ליקויי חמה (מכל





איור 2: גאומטרית מסלול סיבוב הירח ביחס למישור המילקה

סארוס מספר 139. סדרה 139 החלה בליקוי חלקי קטן בקו רוחב צפוני בשנת 1501; לאחר כ-7 ליקויים חלקיים, כל אחד במשך זמן ארוך יותר, החלה סדרת ליקויים מרכזיים, החל מהליקוי ההיברידי (שהוא על הגבול בין ליקוי טבעתי למלא; על כך בהמשך) של אוגוסט 1627. במהלך המאות ה-19 וה-20 כללה סדרה 139 כמה ליקויים מלאים שמשכם הלך והתארך; שני הליקויים האחרונים היו ב-1970 וב-1988. הליקוי של מרץ 2006 יהיה בעל משך זמן מרבי של 4:07 דקות. הליקוי בעל משך הזמן הארוך ביותר של הסדרה כולה יתרחש ביולי 2168 – 7:29 דקות (רק 3 שניות פחות ממשך הזמן המרבי התיאורטי

### ליקוי מלא מתרחש כאשר ישנה הסתרה מוחלטת של השמש, כלומר הגודל הזוויתי הנראה של הירח שווה לזה של השמש או עולה עליו, וחרוט הצל המלא של הירח מגיע אל פני כדור-הארץ

לליקוי חמה מלא). ליקויים מלאים ארוכים של הסדרה ימשכו במהלך המאה ה-23, עם משכי זמן הולכים וקצרים, עד אשר תסתיים הסדרה בכמה ליקויים חלקיים בקווי רוחב דרומיים, בין השנים 2619 ל-2763. לסיכום, סדרת סארוס 139, אשר מתפרשת על פני תקופה של 1,262 שנים, תכלול בסך-הכל 71 ליקויים. היא החלה ב-7 ליקויים חלקיים, המשיכה ב-12 ליקויים היברידיים, לאחר מכן 43 ליקויים מלאים (שבעיצומם אנו מצויים כעת), ותסתיים ב-9 ליקויים חלקיים נוספים. בשנת 2006 יתרחש ליקוי חמה אחד נוסף – ליקוי טבעתי ב-22 לספטמבר – הליקוי ה-16/70 (ה-16 מתוך 70) בסדרה אחרת, סדרת סארוס 144.

הגדלים הזוויתיים הנראים של הירח והשמש דומים, אבל ←

אחדות צפונה או דרומה, בגלל ההבדל של 0.46 יום בין 19 שנות ליקויים והסארוס.

כל סדרת סארוס, כלומר, סדרת ליקויים בעלי מאפיינים דומים המתרחשים בהפרשי זמן של כ-18 שנים, מתחילה בליקויים חלקיים אחדים ליד אחד הקטבים (או לפחות בקווי רוחב גבוהים, צפון או דרום. במקרה זה, ראוי להבין, חרוט הצל המלא נופל כביכול מחוץ לדסקת כדור-הארץ, "מפספס" אותנו). לאחר מכן מתרחשים כמה עשרות ליקויים "מרכזיים" (כלומר מלאים או טבעתיים, על כך בהמשך), והסדרה מסתיימת בליקויים חלקיים נוספים סמוך לקוטב המנוגד. סדרת סארוס (המתחילה כאמור בכמה ליקויים סמוך לקוטב אחד ומסתיימת בליקויים אחדים סמוך לקוטב המנוגד) אינה נמשכת לנצח, ויכולה להכיל בין 69 ל-87 ליקויים (ובממוצע כ-77 ליקויים, מתוכם כ-40 עד 60 מרכזיים), על פני תקופה של כ-1,262 עד 1,550 שנים. ראוי להבהיר ולהדגיש שוב, כי ליקויים עוקבים (במהלך שנה קלנדרית או רצף של שנים קלנדריות) אינם משתייכים לאותה סדרת סארוס אלא לכמה סדרות שונות, שאנו מגדירים אותן כ"חיות במקביל". משך הזמן בין ליקויים עוקבים במספורם בתוך סדרת סארוס מסוימת (למשל, ליקוי 28 וליקוי 29 בסדרת סארוס מספר 139) הוא של כ-18 שנים – משך מחזור הסארוס. בכל זמן נתון, ישנן כ-40 סדרות סארוס "פעילות" המתקדמות במקביל. כרגע, למשל, פעילות 39 סדרות, מסדרה 117 (שמתפרשת על פני השנים 792-2054) ועד סדרה 155 (1928-3190). חוקיות מספור סדרות הסארוס הנהוגה כיום (למשל, העובדה שלליקויי חמה המתרחשים ליד ה"קשר היורד" של הירח מספרי סארוס זוגיים, בעוד שלליקויים סמוך ל"קשר העולה" מספור סדרות אי-זוגיים) היא זו שקבע האסטרונום ההולנדי ון דן ברג (van den Bergh) ב-1955.

הליקוי של ה-29 במרץ 2006 הוא הליקוי ה-29 בסדרת

← נתונים לוואריאציות בגלל המסלולים האליפטיים של כדור-הארץ (סביב השמש) והירח (סביב כדור-הארץ). **ליקוי מלא** מתרחש כאשר ישנה הסתרה מוחלטת של השמש, כלומר הגודל הזוויתי הנראה של הירח שווה לזה של השמש או עולה עליו, וחרוט הצל המלא (האומברה) של הירח מגיע אל פני כדור-הארץ. ליקוי החמה

**ליקוי מלא/מרכזי יכול להיראות רק ממסלול צר יחסית המצוי בגבולות חרוט הצל המלא החולף על פני כדור-הארץ ממערב למזרח, במהירות של כ-3,200 קמ"ש**

המלא בעל משך הזמן המרבי מתרחש כאשר הירח מצוי בנקודה הקרובה ביותר לכדור-הארץ – פריגיאון (perigee), בעוד כדור-הארץ מצוי במסלולו בנקודה המרוחקת ביותר מהשמש – אפהליון (aphelion). כפי שצוין, הליקוי המלא הארוך ביותר יכול להגיע למשך של כ-7:32 דקות, וזה יכול להתרחש רק כאשר חרוט הצל מגיע לאזור המשווה של כדור-הארץ ובסמוך לצהרי היום. **ליקוי טבעתי** מתרחש כאשר הגודל הזוויתי הנראה של הירח נופל מזה של השמש, כלומר חרוט הצל המלא של הירח אינו מגיע לפני כדור-הארץ (איור 3). אז נראית רצועה דקה מהיקפה של השמש סביב צל הירח הכהה (איור 4).

**ליקוי היברידי (hybrid)**, היינו בן-כלאיים – טבעתי/מלא, מתרחש כאשר הגדלים הזוויתיים של הירח והשמש כמעט זהים. ליקוי כזה הוא טבעתי לאורך מרבית האזורים על פני כדור-הארץ שבמסלול הצל, ורק באזור המרכזי של המסלול, מצליח חרוט הצל המלא להגיע בדיוק אל פני כדור-הארץ ומתקבל ליקוי

מלא, קצר במשכו. כפי שכבר הוזכר, ליקויים מלאים וליקויים טבעתיים (כמו גם היברידיים, כמובן) משויכים לקטגוריה של **ליקויים מרכזיים**. הכיסוי המרבי של הירח את השמש בליקוי מרכזי (כלומר, כאשר הירח בקרבה מרבית לכדור-הארץ (perigee) וכדור-הארץ בנקודה הרחוקה ביותר מהשמש (aphelion)) הוא כיסוי של כ-108% (כלומר, הגודל הזוויתי הנראה של הירח גדול ב-8% מהגודל הזוויתי של השמש). לעומת זאת, הכיסוי המזערי של הירח את השמש בליקוי מרכזי (כלומר, ליקוי טבעתי שבו מתקבלת הטבעת המרבית בעוביה, כאשר הירח בריחוק מרבי מכדור-הארץ (apogee) וכדור-הארץ בנקודה הקרובה ביותר לשמש (perihelion)) הוא כיסוי של כ-91%. **ליקוי חלקי** מתרחש כאשר הירח מסתיר רק חלק מהשמש (איור 5). ליקוי חלקי יכול להיראות מאזורים נרחבים על פני כדור-הארץ, שבהם פוגע אזור הצל החלקי (הפנומברה) של הירח, בעוד ליקוי מלא/מרכזי יכול להיראות רק ממסלול צר יחסית המצוי בגבולות חרוט הצל המלא החולף על פני כדור-הארץ ממערב למזרח, במהירות של כ-3,200 קמ"ש. הרחב המרבי של נתיב הסתרה מלאה הוא 270 ק"מ; כל צופה הנמצא מחוץ לפס יראה ליקוי חלקי בלבד.

חישובי התדירות של סוגי הליקויים השונים מראים שבמוצע, ליקוי מרכזי יתרחש (במקום כלשהו על פני כדור-הארץ) אחת ל-233 ימים, בעוד ליקוי חלקי יתרחש אחת ל-153 ימים. כלומר, על פני תקופה של מאה שנה, מתרחשים במוצע כ-238 ליקויים, ומתוכם 156 ליקויים מרכזיים. אתר הליקויים של נאס"א מתאר את סטטיסטיקת ליקויי החמה על פני תקופה של 6,000 שנים, משנת 1999 לפנה"ס ועד 4000, ומוציגים בו המספרים האלה: בסך-



איור 3: ליקוי חמה טבעתי ומסלול הליקוי הטבעתי (מתוך: Fred Espenak, www.MrEclipse.com)





4

איור 4: הליקוי הטבעתי של ה-3 באוקטובר 2005 (ליקוי 43/71 בסדרת סארוס 134, שהגיע ליחס כסוי של 0.96 ומשך זמן מרבי של 4:31 דקות), כפי שצילם בספרד Stefan Seip (לקוח מאתר APOD)

הכל 14,263 ליקויים, מתוכם 5,029 חלקיים (35%), 4,699 טבעתיים (33%), 3,797 מלאים (27%) ו-738 היברידיים (5%). כדאי לשים לב גם לעובדה, שיש ליקויים מלאים רבים יותר בתקופת הקיץ (של חצי הכדור הצפוני), אז נמצא כדור-הארץ בקרבת האפלהליון ולשמש גודל זוויתי נראה קטן יותר. כמו כן, מכיוון שבזמן הקיץ של חצי הכדור הצפוני ציר הסיבוב העצמי של כדור-הארץ (או לחלופין – הקוטב הצפוני) מופנה לעבר השמש, ליקויים מלאים מופיעים בתדירות גבוהה יותר בחצי הכדור הצפוני מאשר בדרומי. ההפך מזה תקף לליקויים טבעתיים, הדורשים שמש גדולה יותר ביחס אלינו, הצופים מכדור-הארץ.

באיור 6, הלקוח מאתר הליקויים של נאס"א, מוצגים מסלולי כל ליקויי החמה המרכזיים לשנים 2001-2020. בהצגה כזו של מסלולי הצל על גבי מפת עולם משוטחת, מעניין לשים לב לגאומטריה: הבדלים ברוב ובצורות המסלול, כמו גם ביחס למיקום הגאוגרפי – משווה מול קטבים. למשל, ההבדל בין מסלול המצפין או מדרים בתנועתו מזרחה, טמון בהיות הירח סמוך לקשר עולה או יורד, במסלולו סביב כדור-הארץ. חישובים מדויקים של גאומטריית ליקויים הם עניין מורכב; ובשורה התחתונה, כל מאפייני מסלול הצל – מיקום המסלול, אורכו, רוחבו וצורתו – תלויים בכל מאפייני המערכת כדור-הארץ-ירח-שמש: המהירות וכיוון התנועה של כל גוף, הגדלים והמרחקים היחסיים, נטיית מישור הסיבוב של הירח ונטיית סיבובו העצמי של כדור-הארץ; וכאילו לא די בכך, ישנם עוד שינויים עדינים, על פני תקופות זמן שונות, כמעט בכל המאפיינים שהזכרו. התבוננות



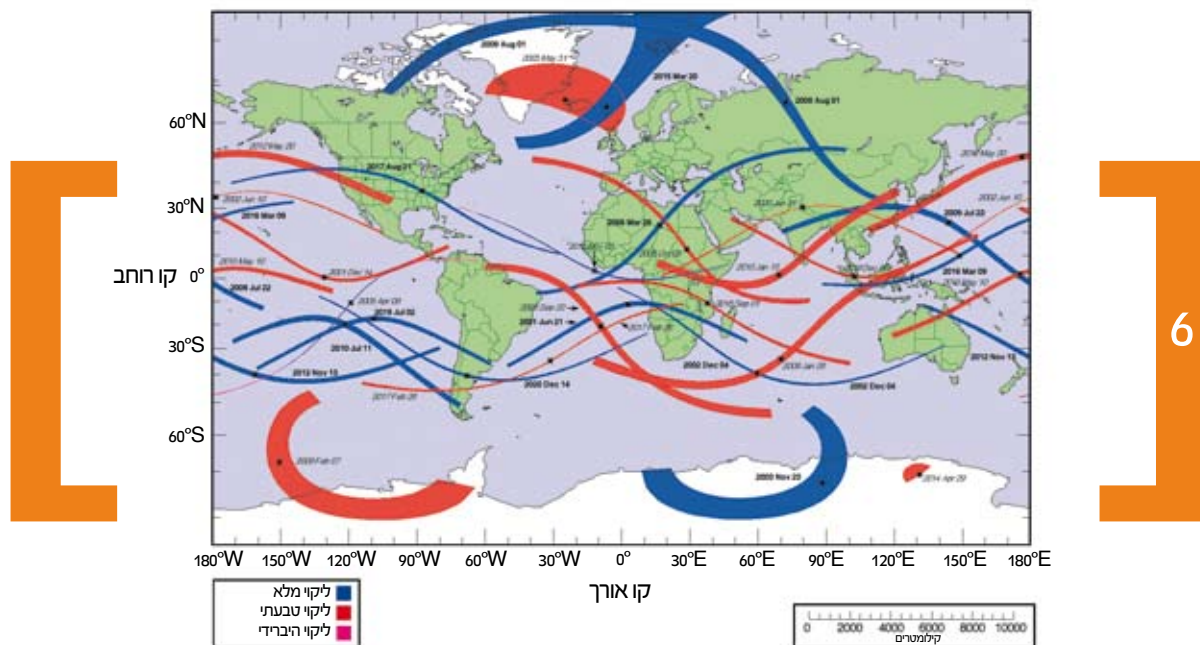
5

איור 5: אותו הליקוי של ה-3 באוקטובר 2005 (איור 4), אולם כליקוי חלקי, כפי שנראה מישראל. התמונה צולמה מאוניברסיטת תל-אביב בזמן איחוע שקיים המועדון האסטרונומי של אוניברסיטת תל-אביב לרגל הליקוי (למעשה, שעות ספורות לפני ערב ראש השנה. אמרנו כבר שליקוי חמה מתרחש במולד – תחילת חודש עברי?). צילום: עפר ירון, באמצעות מצלמה דיגיטלית דרך עינית טלסקופ מצויד בפילטר (שמידט קסגרין LX3 10, תודתי לאסף בחולד, בעליו)

נוסעים ואנשי צוות על גבי כמה אניות מיהרו בעקבותיו בניסיון לראותו ולצלמו, בעודם מבצעים תמרונים משעשעים במנוסה מכיסוי עננות וחיפוש פיסות שמיים נקיות. עוד הוכחה מה אנשים מסוגלים לעשות בכדי להתרשם מליקוי מלא, ואפילו קצר באורכו. הליקוי הטבעתי הארוך ביותר יהיה זה של ינואר 2010 – 11:08 דקות; הקצר ביותר – הליקוי הטבעתי של אפריל 2014 – למעשה אפסי במשכו (ובאופן צפוי, אכן בקרבת קוטב). במהלך ליקוי מלא אפשר להבחין בכמה תופעות מעניינות. ליקוי מתחיל כאשר השפה המזרחית של הירח "נוגעת" ←

באיור 6 מגלה כי הליקוי המלא היחיד בסביבתנו הקרובה (למעשה עד שנת 2027, שאינה כלולה בתרשים, אז יעבור ליקוי מלא דרך מצרים, ושם גם יהיה שיאו) הוא זה של מרץ 2006. כמו כן אפשר לראות את מסלול הליקוי הטבעתי של אוקטובר 2005, שחלף באופן מרשים על פני כל מרכז ספרד. הליקוי המלא הארוך ביותר בתקופה המוצגת הוא זה של יולי 2009 – 6:39 דקות. הליקוי המלא הקצר ביותר היה הליקוי ההיברידי של אפריל 2005 – 00:42 דקות. (מרכזו של ליקוי זה לא הגיע ליבשה וינפ"ל באוקיינוס השקט, ממערב לחופי דרום אמריקה. כ-1,500

## מסלולי הליקויים המלאים והטבעתיים בשנים 2001-2020



איור 6: מפת העולם ועליה מסלולי הליקויים המרכזיים לשנים 2001-2020 (נאס"א)

או קטע קיר), במעין פסים דקים, בהירים וכהים לסירוגין, הנעים בתנועה גלית; זוהי תופעה אטמוספירית הידועה כ**רצועות צל** (shadow bands), ומקורה בעיוות קרני השמש בגלל אי-סדירויות באטמוספירת כדור-הארץ. כאשר הסהר הדק של השמש מתחיל להיעלם, כ-10-20 שניות לפני תחילת הליקוי המלא, מתגלות נקודות קטנות של אור המפוזרות באופן בלתי מסודר סביב השפה הנעלמת של השמש, ויוצרות מראה של מעין שרשרת חרוזים העוטפת את הדסקה הכהה של הירח (איור 7א). מראה זה מוכר בשם **חרוזי ביילי** (Bailey's beads), על שם האסטרונום האנגלי בן המאה ה-18 שהיה הראשון שתיאר את התופעה. החרוזים הם למעשה קרני השמש האחרונות העוברות דרך העמקים והחריצים שבשפת הירח. כאשר נותרת נקודת אור בודדת, מתקבל המראה הקלאסי של **"טבעת היהלום"** (איור 7ב). נצנוץ רגעי זה בהיקפו של צל הירח הכהה מסמן את רגע **המגע השני** (2nd contact); קרן השמש האחרונה נעלמת ואנו בתחילתו של הליקוי המלא. את החשכה שסביב מאירה מעט **העטרה (קורונה<sup>2</sup>)** הבהירה העוטפת את דסקת השמש המוסתרת (איור 7ג). בהירות הסביבה משתנה מליקוי לליקוי ובהתאם לתנאים במקום באותו רגע (מיקום השמש בכיפת השמיים, תנאים אטמוספריים וכיוצא באלה), אולם אפשר להשוותה לזו הקיימת בנוכחות ירח מלא. בהירות העטרה היא כמיליונית מבהירות השמש עצמה, ואם

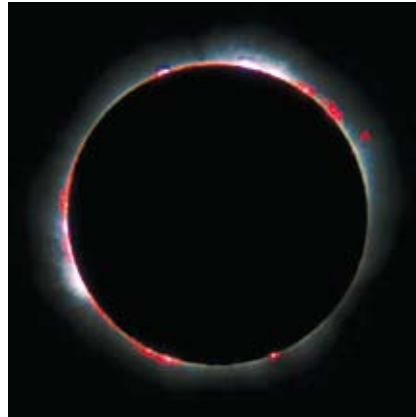
בדקות האחרונות של הליקוי החלקי מתחילה הדרמה האמיתית. השמיים מתכהים במהירות, ולעתים לובשים גוון ירקרק מסתורי. מכיוון האופק המערבי, צל כהה מתקרב וגדל. ממש לפני תחילת הליקוי המלא אפשר להבחין, במיוחד על גבי משטחים בהירים וחלקים, בפסים בהירים וכהים לסירוגין הנעים בתנועה גלית

← בקצה המנוגד (המערבי) של השמש (כלומר, שני הקצוות נראים על אותו קו הראייה ביחס לצופה); זהו המגע הראשון (1st contact). לאחר שניות אחדות תיראה דמות השמש כאילו ננגסה ממנה חתיכה; הנגיסה הולכת וגדלה ככל שהירח מכסה חלק גדול יותר מפני השמש. למעשה, כמעט לא מורגשת כל ירידה במידת ההארה או בטמפרטורת הסביבה עד לדקות האחרונות של הליקוי החלקי. או-אז מתחילה הדרמה האמיתית. השמיים מתכהים במהירות, ולעתים לובשים גוון ירקרק מסתורי, שונה מחשכת לילה רגילה או מחשכה הנוצרת בשל התכסות רגילה של עננות. מכיוון האופק המערבי, צל כהה מתקרב וגדל. ממש לפני תחילת הליקוי המלא אפשר לעתים להבחין, במיוחד על גבי משטחים בהירים וחלקים שעל הקרקע (כגון רצפה חשופה

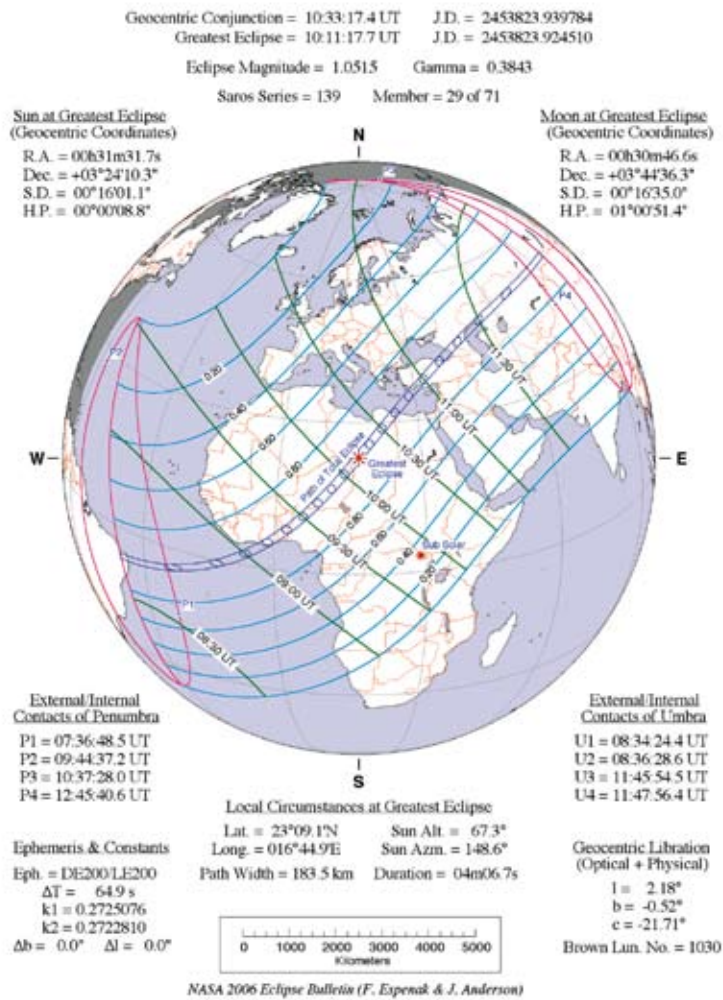
אין נעזרים באמצעי הסתרה מלאכותיים, אפשר לראותה רק בזמן ליקוי חמה מלא. העטרה נראית כמורכבת מפסים/מבנים מוארכים דקיקים המשתרעים מפני השמש לכל הכיוונים, למרחק של עד כמה רדיוסי שמש, טרם דעיכתם בחשכה שסביב (המבנים המוארכים הם למעשה סילוני פלזמה המתועלים לאורך קווי השדה המגנטי של השמש; לקווי השדה הן מבנים דמויי לולאות והן מבנים קווים ישרים). בניגוד למהלך האירועים האטי בזמן הליקוי החלקי, האירועים החל מסמוך למגע השני מתרחשים בקצב מהיר (מהיר מדי?). כמה שניות לאחר תחילת הליקוי המלא, אפשר לעתים להבחין בצבע האדמדם-ורדרד של ה**כרומוספרה**<sup>3</sup>, השכבה הדקה המפרידה בין הפוטוספרה (פני השמש) לעטרה, ואולי אף בכמה ממאפייניה, כגון התפרצויות ובלטות (prominences). לאחר כמה עשרות שניות, כאשר העיניים כבר מורגלות לחשכה (ואם מסוגלים להסיר מבט, ולו לזמן קצר, מהאזור הסובב את השמש), אפשר לנסות לזהות כוכבים בהירים בכיפת השמיים, כוכבי-לכת אם מצויים מעל האופק, ואם ממש מתמזל המזל, לעתים מתגלה בזמן ליקוי מלא שביט המצוי בקרבת השמש בדיוק באותה התקופה. חשכת הליקוי המלא מזכירה זמן לילה, ועולם החי והצומח מגיב בהתאם. הציפורים מפסיקות את ציוצן, ופרחי יום מתחילים להיסגר כאילו הם מכינים את עצמם ללילה. ירדת הטמפרטורה והקריירות המתפשטת תחת צל הירח מורגשים; הסביבה כולה עוצרת לכת ומשתררת דממה, לרגע קצר ←

3 העטרה (קורונה) היא אטמוספרת הפלזמה (חלקיקי גז טעונים חשמל) שמסביב לשמש, המשתרעת על פני מיליוני ק"מ אל מרחבי החלל הסובב. הטמפרטורה בעטרה גבוהה מאוד (עשויה להגיע לכמיליון מעלות ויותר), והיא פולטת קרינת X אנרגטית.

4 הכרומוספרה ("ספרת הצבע") היא השכבה הדקה באטמוספרת השמש העוטפת את הפוטוספרה – פני השטח של השמש כפי שאנו רואים אותה. עובי הכרומוספרה כ-2,500 ק"מ, והטמפרטורה בשכבתה החיצונית, באזור המעבר שלפני בסיס העטרה, מגיעה לכמה עשרות אלפי מעלות.



איור 7: (א) תבנית "חרוזי בייל" (Bailey's beads); (ב) תבנית "טבעת הולם" קלאסית; (ג) העטרה בתפארתה. (חלק מסדרת תמונות מהליקוי המלא של 1999 מצרפת, שצילם Luc Viatour ומופיעות באתר ויקיפדיה)



איור 8: נתוני הליקוי המלא של ה-29 במרץ 2006; נתונים כלליים ומסלולי האומברה (צל מלא) והפנומברה (צל חלקי)

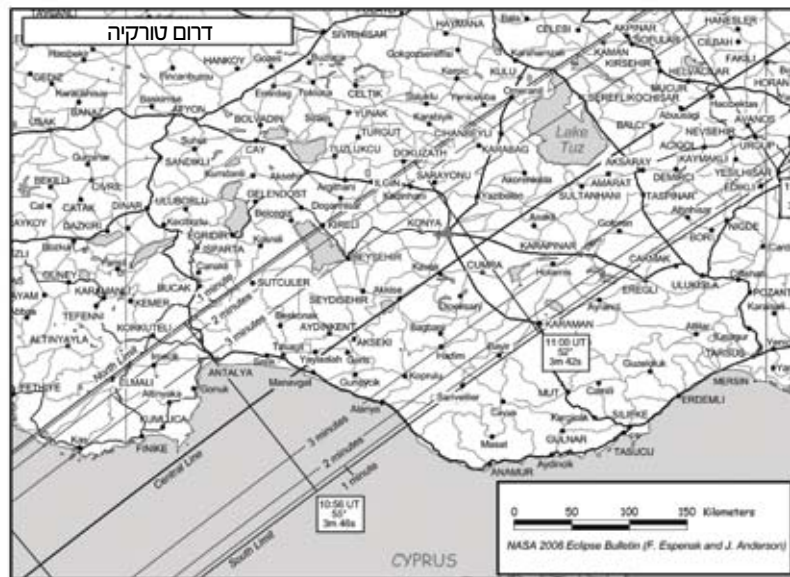
**הרביעי (4th contact)**, סוף הליקוי כולו. מידע רב ומשמעותי יכול להתקבל מבדיקות, מצילומים וממדידות הנעשים בזמן ליקוי מלא. אמנם כיום יש ביכולתנו לצלם ולבדוק מאפיינים באטמוספירת השמש ובעטרה דרך קורונגרפים (coronagraphs) שעל גבי טלסקופים חלליים המייצרים הסתרה מלאכותית של דסקת השמש; אך בעבר, האפשרות היחידה לצפייה בעטרה היתה בזמן ליקוי. מלבד זאת, ישנן כמה מדידות נוספות בעלות משמעות, שאותן מבצעים אסטרונומים כמעט בכל ליקוי מלא. למשל, תזמון מדויק של ארבע נקודות המגע שהוזכרו מאפשר לחוקרים להבחין באי-התאמות בין הזמנים החזויים לנמדדים, היכולות לנבוע בעיקר

← וקסום זה של חשכת-אמצע-יום. לנוף בכיוון האופק הסובב גוון כתמתם, בדומה לזמן זריחה; זהו האזור המואר שעוטף את האזור המצוי בצל הירח. עם סיומו של הליקוי המלא, מתחילים לראות קרני אור ראשונות מהפוטוספירה בשפה המערבית של השמש. זהו **המגע השלישי (3rd contact)**, שבו נעלם מראה העטרה, ולמעשה מתרחשים אותם האירועים של תחילת הליקוי שהוזכרו למעלה, אך בסדר הפוך ובשפה המנוגדת של דסקת השמש; מראה טבעת היהלום, חרווי ביילי, ושיבתו של סהר דק, ההולך ומתמלא. אור היום חוזר, הקרירות בחסותו של הצל מתפוגגת, ופעילויות היום מתחדשות לאחר ההפסקה הקצרה. רגע היפרדות הירח מקדמת דסקת השמש מסמל את **המגע**

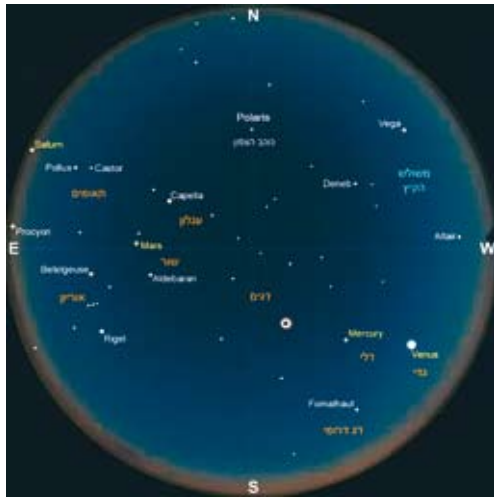
מהפרעות במסלול הירח או מאי-סדיריות בסיבוב כדור-הארץ. בנקודות המגע הראשונה והשלישית אפשר למדוד ספקטרום מיוחד, ה-*flash spectrum*, כאשר קווי הבליעה (הכהים) של הפוטוספרה מתחלפים בקווי פליטה (בהירים) מהכרומוספרה התחתונה. תורת היחסות הכללית של איינשטיין נבדקה לראשונה בזמן ליקוי החמה המלא של ה-29 במאי 1919 (ביוזמתו ובניהולו של האסטרופיזיקאי הבריטי הנודע ארתור אדינגטון). אז אומתה ההשערה כי שדה הכבידה של השמש אכן מעקם קרני אור כוכבים העוברות בסמוך. מדידות יונוספריות גילו שקטעון (cut-off) קרינת ה-UV מהשמש בזמן ליקוי מלא יכול לגרום לשינוי בתכונות המוליכות החשמלית של האטמוספרה העליונה (כמו בשקיעה ובזריחה רגילות של השמש, אך במהירות גדולה בהרבה). מידע כזה ואחר יכול להתקבל ממעקב אחר תופעות המתרחשות בזמן ליקוי חמה מלא.

ביום רביעי, ה-29 במרץ 2006, ייראה ליקוי מלא מרצועה דקה שתשתרע על פני כשליש מכדור-הארץ (כפי שצוין, זהו הליקוי ה-29/71 בסדרת סארוס 139). מסלול הצל המלא מתחיל בזמן הזריחה בברזיל (8:36 UT), משך הליקוי שם 1:53 דקות ממרכז פס הצל שעוביו כ-129 ק"מ, חוצה את האטלנטי, מגיע לשיאו בגבול ציאד ולוב שבצפון אפריקה (10:11 UT), משך הליקוי בשיא – 4:07 דקות, השמש בזווית  $67^\circ$  מעל האופק, ורוחב הפס

184 ק"מ), חוצה את מזרח הים התיכון לעבר טורקיה (מגיע לחוף הדרומי של טורקיה בשעה 10:54 UT. באנטליה, הממוקמת כ-50 ק"מ צפונית-מערבית למרכז הפס, משך הליקוי המלא 3:11 דקות), הים השחור (11:10 UT), מעבר לרכס הרי הקווקז, ולעבר מרכז אסיה. סיומו של הליקוי בשקיעה, לאורך גבולה הצפוני של מונגוליה בשעה 11:48 UT. ליקוי חלקי ייראה מאזורים נרחבים יותר הכוללים את מרבית אפריקה, כל אירופה ומרכז אסיה. משך הליקוי כולו – 3 שעות ו-12 דקות. במשך זמן זה חולף צל הירח המלא (האומברה) על פני פס באורך כולל של כ-14,500 ק"מ, שטח המכסה כמעט כחצי אחוז משטח כדור-הארץ. אזור הצל החלקי, לעומת זאת, מכסה יותר ממחצית שטחו של חצי הכדור המואר. באזור 8 מצוינים נתוני הליקוי, ומוצגים מסלולי הצל המלא והחלקי של הליקוי כולו. מידת הכיסוי המרבי של הליקוי (ה-*eclipse magnitude*), שערכה הוא 1.0515, היא למעשה היחס בין הגדלים הזוויתיים הנראים של הירח והשמש (או לחלופין, יחס הקטרים כפי שהם נראים מכדור-הארץ, בהתחשב במרחקם ממנו). גאמא, שערכו כאן 0.3843, מציין את המרחק המזערי ממרכז כדור-הארץ שאליו מגיע ציר חרוט הצל ביחידות של רדיוסי כדור-הארץ (ככל שערכו של גאמא קטן יותר, הליקוי חזק יותר, כלומר בעל מידת כיסוי גדולה יותר ולפיכך גם ארוך יותר במשכו). כפי שאפשר לראות, ישראל אינה ←



איור 9: מסלול פס הליקוי המלא של ה-29 במרץ 2006 בדרום טורקיה. הנתונים המופיעים במלבנים הממוסגרים – זמן שיא הליקוי (UT), גובה השמש בשמיים ומשך זמן הליקוי המלא, תקפים למיקום הסמוך שעל הפס המרכזי



10

← מצויה במסלול הליקוי המלא, והליקוי מישראל ייראה חלקי אבל בשיעור מרבי מכובד של כ-83%. כפי שאפשר היה להסיק מתיאור מהלך האירועים של ליקוי מלא, ליקוי בשיעור 83% אינו מתבטא בירידה מורגשת במידת ההארה של הסביבה (ירידה משמעותית בהארת הסביבה מורגשת רק אם מידת הכיסוי של דסקת השמש עוברת את 98-99 האחוזים), אבל בהחלט מרשים לצפייה בעזרת אמצעים אופטיים ופילטרים מתאימים. ובהקשר זה ראוי להדגיש שוב: **אין להתבונן בשמש בלא אמצעי הגנה מתאימים (ולא מאולתרים). תצפית בשמש בלא אמצעי הגנה עלולה לגרום לנזק בלתי הפיך לעין ואף לעיוורון!**

איור 10: "חשכת-אמצע-יום", כיפת השמיים - כוכבים בהירים וכוכב-לכת, כפי שהיא אמורה להיראות בזמן הליקוי המלא של ה-29 במרץ 2006 (11:00 UT) מאזור מנווגאט שבדרום טורקיה. גבול הבהירות (Magnitude limit) -2.5. (האיור לקוח מאתר ליקוי ה-29 במרץ 2006 של ODTU, בתוספות אחדות)

זמני הליקוי החלקי בארץ (בזמן מקומי, מדויקים למרכז הארץ - תל-אביב) הם

כדלהלן: **תחילת הליקוי - 11:37, שיא הליקוי - 12:56, סיום הליקוי - 14:13.** באזור מרכז הפס שלחופי דרום טורקיה, בקרבת מנווגאט (Manavgat) (איור 9), זמני הליקוי קרובים מאוד לזמני תל-אביב, בהפרש של שעה (בישראל הזמן המקומי, נכון ל-29 במרץ, הוא שעתיים אחרי הזמן האוניברסלי (UT), ואילו באזור אנטליה, 3 שעות אחרי UT). להלן **זמני ארבעת המגעים מאזור מנווגאט (בזמן מקומי): מגע ראשון** (תחילת ליקוי חלקי) - 12:38, **מגע שני** (תחילת ליקוי מלא) - 13:55, **מגע שלישי** (סוף ליקוי מלא) - 13:59, **מגע רביעי** (סוף ליקוי חלקי) - 15:13. **סך כל משך הליקוי המלא מאזור מרכז הפס באזור מנווגאט - 3:45 דקות.**

מרקורי. אף שלא נראים כוכבים בהירים ממש בסמיכות לשמש, יהיה אפשר לנסות לזהות את מקצתם, אפילו אם הם נמוכים יחסית לאופק בכיוונים השונים, עובדה המקשה את הצפייה והזהיה. שלושת הכוכבים המרכזיים את "משולש הקיץ הגדול", Deneb ( $m_v=1.25$ ) - זנב הברבור, Altair ( $m_v=0.76$ ) בקבוצת נשר, ו-Vega ( $m_v=0.03$ ) בקבוצת נבל, סמוכים לאופק המערבי/צפון-מערבי. Betelgeuse ( $m_v=0.45$ ) ו-Rigel ( $m_v=0.18$ ) אשר בקבוצת אוריון נמצאים מזרחית לשמש, כ-22 מעלות לערך מעל לאופק המזרחי. Aldebaran ( $m_v=0.87$ ) - עין השור (לא רחוק ממאדים), ו-Capella ( $m_v=1.17$ ) בקבוצת עגלון, מצויים צפון-מזרחית לשמש. ולבסוף, Fomalhaut ( $m_v=1.17$ ) בקבוצת דג דרומי, בסמוך לאופק הדרום-מערבי.

במיתולוגיה, באגדות ובכתבים של תרבויות שונות מתקופות שונות, מסמלים הליקויים הכחדה והשמדה, ונתפשים כתופעה הזורעת פחד, כהיפוך סדר הדברים הטוב והמוכר. המילה האנגלית לליקוי, eclipse, נגזרת מן המילה היוונית *eclipse*, שפירושה לנטוש או לחלופין, לחדול להתקיים. פשוטו כמשמעו, ליקוי היה משול לעזיבתה של השמש את הארץ. דימוי נפוץ היה, ועדיין הנו בסיפורים ובתרבויות מסוימות, זה של דרקון הטורף לאטו את השמש. הסינים הקדמונים היו מייצרים רעש והמולה רבה בזמן ליקוי חמה, חובטים ודופקים על סירים ותופים, בכדי להפחיד ולהבריח את הדרקון האיום והגרן. אנשי האינקה ניסו גם הם להבהיל ולהטיל אימה על אותם יצורים חצופים, המנסים לאכול את השמש שלהם. בהודו נקטו האנשים גישה שונה, וטבלו במים עד הצוואר, מתוך אמונה ותקווה שמעשה לשמש בקבוצת שור - מאדים, בבהירות  $m_v=1.3$ , חיוור במעט

דף ליקויי חמה בוויקיפדיה [http://en.wikipedia.org/wiki/Solar\\_eclipse](http://en.wikipedia.org/wiki/Solar_eclipse)  
אסטרונומיה: האנציקלופדיה לאסטרונומיה ולאסטרופיזיקה של המועדון האסטרונומי של אוניברסיטת תל-אביב. מאמרים רלוונטיים: ליקוי ירח, ליקוי חמה, ליקויים והסארוס.  
<http://astroclub.tau.ac.il/astropedia>

ביום רביעי ה-22 במרץ, בשעות 20:00-22:00, יתארח עפר ירון בפורום "גליליאו" ויענה על שאלותיכם על המאמר ועל הליקוי בסוף החודש. המעוניינים מוזמנים להיכנס לפורום דרך אתר SBC:  
<http://www.sbc.co.il/index.asp>

שליקויים נתפשו כסימנים מבשרי רעות; שהרי ברוב התרבויות, ידוע וברור שהשמש היא מקור קבוע של אור וחיים. אך טבעי הוא, שחסימתה או הסתרתה של השמש תיחשב תופעה שלילית; מאורע המעורר תחושה מבשרת רעות. גם אם כיום אנו מחזיקים בתפישה מדעית של תופעת הליקוי, ואיננו מאמינים בסיפורים ובתיאורים שכאלה, הרשו לי להציע משהו לכולנו, שאותו גם אני מתחייב ליישם לראשונה בליקוי הקרוב. בעודכם צופים (בעזרת ציוד מתאים!) בנגיסה ההולכת וגדלה מעיגול החמה, ואם התמזל מזלכם להימצא באזור הליקוי המלא – אף חשים בעלטה ובקריירות היורדות על האזור, הקדישו רגעים אחדים של מחשבה לאותו הדרךון החצוף שם למעלה; עד כמה הוא נהנה, מן הסתם, להטיל את אימתו על אותם תושבי כוכב-לכת קטן, התלויים כל-כך באורה ובחומה של מה שהפכה, ולו לרגע קט, לארוחתו הדשנה. ■

עפר ירון הוא דוקטורנט לאסטרופיזיקה ולמדעים פלנטריים באוניברסיטת תל-אביב ופעיל בהוראת אסטרונומיה במסגרות חינוכיות וציבוריות.

## ביבליוגרפיה וקריאה נוספת

פת-אל, י, אסטרונומיה: מדרוך להכרת השמיים, קוסמוס, 2005.  
Moore, P., editor, *Philip's Astronomy Encyclopedia*, Philip's, London, 2002.  
Koenig, H., *Solar Eclipses: Geometry, Frequency, Cycles*, in *Math & Astronomy*  
<http://www.pims.math.ca/pi/is-> המאמר נמצא באתר זה:  
<http://www.pims.math.ca/pi/is-sue5/page17-19.pdf>  
אתר הליקויים של נאס"א <http://sunearth.gsfc.nasa.gov/eclipse/eclipse.html>  
אתר נאס"א לליקוי ה-29 במרץ 2006  
<http://sunearth.gsfc.nasa.gov/eclipse/SEmono/TSE2006/TSE2006.html>  
עלון נאס"א הרשמי לליקוי ה-29 במרץ 2006  
<http://umbra.nascom.nasa.gov/eclipse/20060329/text/toc.html>  
אתר ליקויי החמה של ("Mr. Eclipse") Fred Espenak  
<http://www.mreclipse.com/Special/SEprimer.html>  
אתר ליקוי ה-29 במרץ 2006 של (Orta Dogu) ODTU (Teknik Universitesi)  
<http://newton.physics.metu.edu.tr/~aat/TSE2006/TSE2006.html>

## מונחים רלוונטיים

**פריהליון** (perihelion): הנקודה הקרובה ביותר לשמש במסלולו של כדור-הארץ (כדור-הארץ נמצא בנקודה זו בערך ב-3 בינואר בכל שנה), שבה המרחק לשמש הוא 147.1 מיליון ק"מ.  
**אפהליון** (aphelion): הנקודה המרוחקת ביותר מהשמש במסלולו של כדור-הארץ (כדור-הארץ נמצא בנקודה זו בערך ב-4 ביולי בכל שנה), שבה המרחק לשמש הוא 152.1 מיליון ק"מ.  
**פריגיאוון** (perigee): המרחק המזערי בין הירח וכדור-הארץ, כ-356,500 ק"מ, אז לירח גודל זוויתי של 33.6' (דקות קשת; דקת קשת היא 1/60 המעלה).  
**אפוגיאוון** (apogee): המרחק המרבי בין הירח וכדור-הארץ, כ-406,500 ק"מ, אז לירח גודל זוויתי של 29.5'.  
**חודש דרקוני** (draconic): הזמן שלוקח לירח לחזור לאותו הקשר, למשל מקשר יורד אחד לבא אחריו – 27.212 ימים.  
**חודש סידרי** (sidereal): הזמן שלוקח לירח להשלים הקפה סביב כדור-הארץ, ביחס לכוכבים רחוקים – 27.322 ימים.  
**חודש אנומליסטי** (anomalistic): הזמן שנדרש לירח כדי לחזור לאותו האפסיס (apsis – נקודת קיצון – פריגיאוון או אפוגיאוון) – 27.554 ימים. הקו המחבר בין נקודות הקיצון נקרא קו האפסידים, וזה משלים הקפה שלמה ב-8.85 שנים לערך (סובב מזרחה ביחס למישור מסלול הירח).  
**חודש סינודי** (synodic): הזמן החולף בין שני מופעים זהים של הירח (השלמת הקפה ביחס לקו המחבר בין השמש לכדור-הארץ) – 29.530 ימים. לפיכך חודש עברי, שהוא חודש ירחי, כולל כ"ט או ל' ימים. (זהו משך הזמן הארוך ביותר מכל הגדרות ה"חודש" השונות המתייחסות לתנועת הירח סביב כדור-הארץ.)