

## חבר מכוכב אחר: חיים בכוכבי לכת מחוץ למערכת שמש

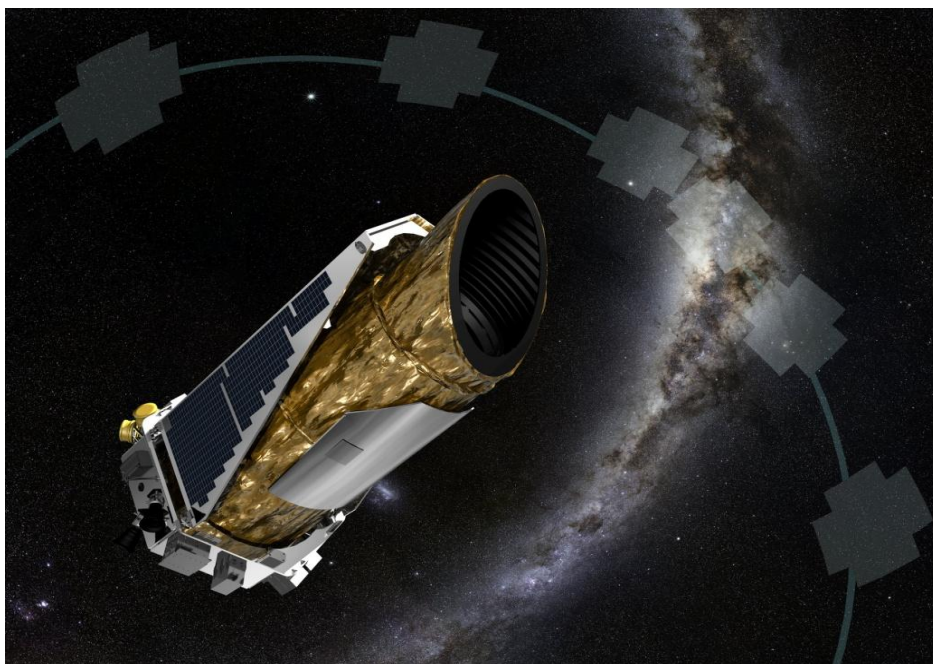
עמרי ונדל, גלילאו, יוני 2015, גיליון 201, עמ' 22-27

מניתוח ממצאי משימת קפלר אפשר להעריך כי לרוב הכוכבים בשביל החלב, גלקסיית הבית שלנו, יש כוכבי לכת הדומים בגודלם לכדור הארץ, ולפחות לחצי מהם יש כוכב לכת כזה ב"איזור החיים", שבו הטמפרטורה מאפשרת קיום מים נוזליים. אם כך, האם קיימים עולמות נוספים שבהם אפשר למצוא חיים, אולי אף תבוניים?

האם קיימים בחלל עוד עולמות עם חיים ואולי אף חיים תבוניים? התשובה לשאלה זו נראית קרובה מאי פעם הודות לנתונים שנאספו על ידי טלסקופ החלל קפלר, שייעודו העיקרי היה לגלות כוכבי לכת במערכות שמש אחרות ("כוכבי לכת חוץ-שמשיים" או extra-solar planets או exoplanets), הדומים (מבחינת הגודל וההרכב) לכדור הארץ ("כוכבי לכת ארציים", terrestrial planets). מניתוח ממצאי משימת קפלר אשר פורסמו לאחרונה ניתן להעריך כי לרוב הכוכבים (שמשות) בשביל החלב, גלקסיית הבית שלנו, יש כוכבי לכת ארציים, ולפחות למחציתם יש כוכב לכת כזה באזור הישיב (Habitable Zone), זאת אומרת "איזור החיים" האזור שבו הטמפרטורה על פני כוכבי לכת (בעל אטמוספירה הדומה לזו של כדור הארץ) מאפשרת קיום מים נוזליים. מאמר שהתפרסם לאחרונה בכתב העת International Journal of Astrobiology משתמש בנתונים אלו כדי להעריך את המרחק לכוכבי לכת נושאי חיים, ומוצא שסביר למצוא כוכבי הלכת עם חיים (לפחות ברמה הפרימיטיבית) במרחק שאינו עולה על עשר עד מאה שנות אור מכדור הארץ (1). תוך שנים ספורות ניתן יהיה לבדוק את ההערכות האלו באמצעות טלסקופי חלל עתידים ושיטות חדשות לגילוי סימני חיים בכוכבי לכת חוץ-שמשיים.

### המהפכה של קפלר

טלסקופ החלל קפלר (2) אשר שוגר ע"י נאס"א בשנת 2009 נועד כאמור למצוא כוכבי לכת חוץ-שמשיים ארציים.



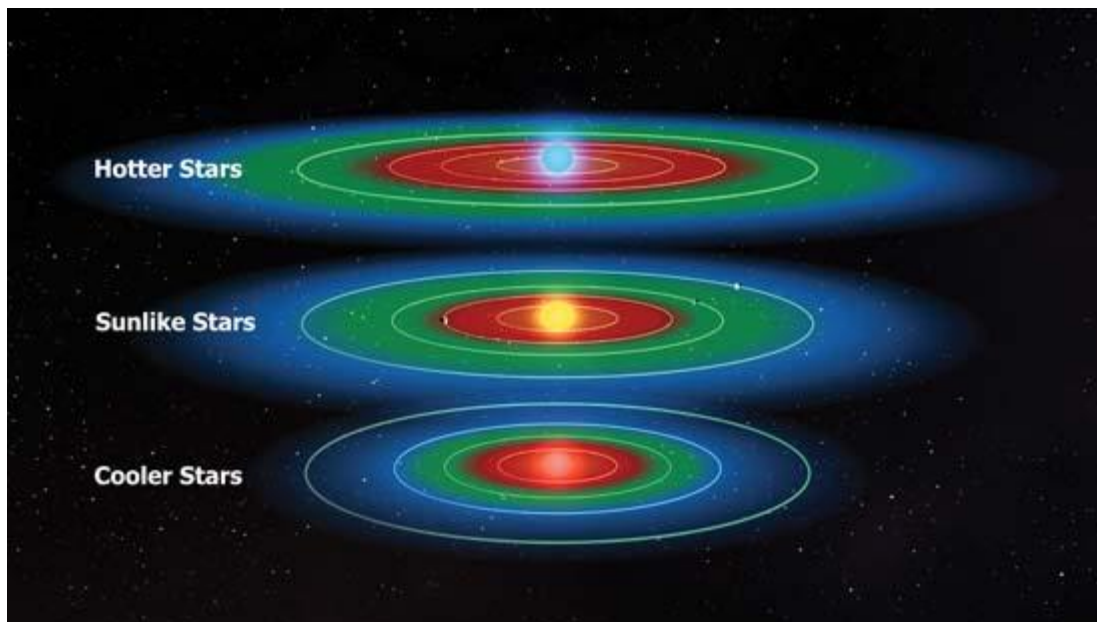
[http://www.nytimes.com/2015/01/07/science/space/as-ranks-of-goldilocks-planets-grow-astronomers-consider-whats-next.html?\\_r=4](http://www.nytimes.com/2015/01/07/science/space/as-ranks-of-goldilocks-planets-grow-astronomers-consider-whats-next.html?_r=4)

עד אז התגלו (בעיקר אחרי שנת 2000) מאות כוכבי לכת חוץ-שמשיים בשיטות עקיפות שונות, בעיקר שיטת ה"ריקוד" או שיטת דופלר (Doppler), שבה מגלים את התנועה הזעירה של השמש (כוכב האם) בשל ההשפעה הגרביטציונית של כוכבי הלכת הסובבים אותה (וראו "כוכב לכת נולד" מאת נח ברוש, גלילאו 162, 28, 2012). כיון שהמשיכה הגרביטציונית הינה יחסית למסה ויחסית הפוכה למרחק, התגלו בשיטה זו בעיקר כוכבי לכת ענקיים, גדולים כמו צדק (הגדול פי 11 מכדור הארץ ומסיבי ממנו פי 300) ויותר, אך קרובים מאוד לשמש שלהם, דבר שהופך אותם לבלתי מתאימים להתפתחות חיים, הן בשל ההרכב (בעיקר גז מימן) והן בשל הטמפרטורה הגבוהה (כאלף מעלות ויותר). טלסקופ קפלר השתמש בשיטה שונה - שיטת המעבר (transit) שהוא ליקוי חלקי קטנטן הנוצר אם וכאשר כוכב לכת עובר בדיוק בינינו לבין השמש שלו ולזמן קצר מסתיר חלק קטן מהאור המגיע לטלסקופ. מעבר כזה קורה במערכת השמש אחת לכמה שנים כאשר נוגה עובר בדיוק בינינו לבין השמש. בציוד מתאים ניתן אז לראותו כנקודה שחורה על פני השמש. טלסקופ קפלר צפה בכמאה אלף כוכבים כדי לגלות ירידות זעירות בשעור 0.01-1% בבהירותם, המתרחשת במחזוריות של ימים עד שנים ועשויה להיגרם על ידי מעבר של כוכב לכת. כיון שמעבר כזה קורה רק במקרים שמישור הסיבוב של כוכבי הלכת מתלכד בדיוק עם קו הראיה בינינו לכוכב האם, הסיכוי לכך קטן ולכן רק בחלק קטן מכל הכוכבים שנבדקו נמצאה התופעה. במקרים שאכן התגלה מעבר, ניתן לחשב את מרחקו של כוכב הלכת מכוכב האם (השמש), ומכאן את הטמפרטורה הצפויה על פניו, את גודלו של כוכב הלכת, ובשילוב עם שיטת דופלר - גם את מסתו ואת צפיפותו. עד כה גילה טלסקופ קפלר כ-4200 מועמדים לכוכבי לכת חוץ שמשיים, שאת מועמדותם היה צריך לאמת בשיטת דופלר. בינואר 2015 אומת כוכב הלכת החוץ-שמשי מספר אלף. מעבר להישג הכמותי שבהגדלת מספר כוכבי הלכת החוץ-שמשים הידועים כמעט פי עשר תוך שנים ספורות, הביא טלסקופ קפלר להישגים מהותיים חשובים אף יותר. ראשית, בשיטת המעבר ניתן לגלות גם כוכבי לכת קטנים, אפילו בגודל כדור הארץ, ולמצוא את שכיחותם. שנית, בשיטת המעבר ניתן לאתר כוכבי לכת שאינם קרובים מאוד לכוכב האם, ולכן יכולים להימצא באזור הישיב של כוכבים הדומים לשמש. לשני גורמים אלו יש חשיבות מכרעת בחיפוש אחרי חיים בחלל - כיון שלפי המקרה היחיד של התפתחות חיים המוכר לנו, כדור הארץ, חיפוש חיים הדומים לחיים בכדור הארץ יהיה מבטיח ביותר עבור כוכבי לכת הדומים לכדור הארץ ונמצאים באזור הישיב סביב כוכבים הדומים לשמש. ניתוח סטטיסטי של תצפיות טלסקופ קפלר מגלה כי לפחות ל 20% מן הכוכבים הדומים לשמש יש כוכב לכת ארצי באזור הישיב סביבו (3). נתונים אלו צפויים להיות מוכפלים הרבה מונים על ידי טלסקופ החלל TESS (7), ממשיכו של קפלר, המתוכנן להיות משוגר בשנת 2017 ולסרוק כחצי מליון כוכבים בחיפוש אחר כוכבי לכת חוץ שמשיים.

## חיים ליד ננסים אדומים

כוכבים בעלי מסה הגדולה יותר מכפליים מסת השמש שלנו, ככל הנראה אינם מתאימים להתפתחות חיים כיון שמשך קיומם קצר ממיליארד שנים. מאידך, רוב הכוכבים בגלקסיית שביל החלב הם כוכבים קטנים (ועמומים) בהרבה מן השמש הנקראים ננסים אדומים, שאורך חייהם גדול מזה של השמש. כיון ששטף הקרינה מננסים אדומים קטן בהרבה מזה של השמש, האזור הישיב שלהם יהיה קטן וקרוב יותר, ולכן כוכבי הלכת באזור הישיב שלהם לא יסתובבו סביב צירם אלא יהיו "נעולים" ע"י כוחות גאות (tidally locked) כך שהם מפנים לשמש שלהם תמיד את אותו צד (כמו כוכב חמה במערכת השמש שלנו), מצב שנחשב לבלתי מתאים להתפתחות חיים.

בנוסף ננסים אדומים נחשבו עד לפני שנים לא רבות לבלתי מתאימים בשל היותם נוטים להתפרצויות עזות, ופליטה של קרינת UV ברמות גבוהות, שעלולות לסכן את קיומם של חיים על פני השטח.



האיזור הישיב של כוכבים שונים

<http://kepler.nasa.gov/multimedia/animations/?ImageID=41>

אולם לאחרונה הראו חישובים כי למרות כל הגורמים הללו תתכן על כוכבי הלכת של ננסים אדומים התפתחות חיים (4), ואפילו פוטוסינתזה ויצירת חמצן (5). תוצאות אלו מגדילות בהרבה את מספרם של כוכבי הלכת שייתכנו בהם חיים כיון שננסים אדומים מהווים כ-75% מן הכוכבים בשביל החלב וניתוח תצפיות טלסקופ קפלר מראה כי לפחות ל 45% מן הננסים האדומים יש כוכב לכת ארצי באזור הישיב סביבם (6).

### משוואת דרייק אחרי קפלר

בכנס בשנת 1961 פרסם האסטרונום האמריקאי פרנק דרייק נוסחה לחישוב מספר התרבויות בגלקסיית שביל החלב אשר מהן ניתן לקלוט שידורי רדיו כדי למצוא חיים תבוניים בעלי טכנולוגית רדיו מחוץ לכדור הארץ. הנוסחה הינה מכפלה של מספר פרמטרים משני סוגים: פרמטרים אסטרונומיים המעריכים את מספר כוכבי הלכת המתאימים להתפתחות חיים, ופרמטרים הקשורים להתפתחות חיים ותרבות. אחת הצורות המקובלות לנוסחת דרייק:

$$N = R_* F_s F_p n_{hz} F_b F_c L$$

באשר  $N$  הוא מספר התרבויות המשדרות בגלי רדיו. הפרמטרים האסטרונומיים הם:

- $R_*$  - קצב יצירת הכוכבים בגלקסיית שלנו (שביל החלב)
- $F_s$  - החלק היחסי של הכוכבים שמתאים להתפתחות חיים על כוכבי לכת סביבם.
- $F_p$  - החלק היחסי של הכוכבים הללו שיש להם כוכבי לכת.
- $n_{hz}$  - מספר כוכבי הלכת הארציים בכל מערכת שמש, הנמצאים באזור הישיב (שהתנאים עליהם מתאימים להתפתחות חיים).

הפרמטרים הביולוגיים-תרבותיים:

- $F_b$  - הסיכוי שעל כוכב לכת עם תנאים מתאימים להתפתחות חיים, אךן יתפתחו חיים ביולוגיים.
- $F_c$  - הסיכוי שבכוכב לכת עם חיים תתפתח תרבות טכנולוגית הפולטת אותות רדיו לחלל.
- $L$  - משך הזמן הממוצע שתרבות כזו תמשיך לפלוט לחלל אותות רדיו.

הביקורת העיקרית כנגד נוסחת דרייק הייתה שרוב הפרמטרים שבה לא היו ידועים והערכתם הייתה בגדר ניחוש. בזמן כתיבת המשוואה היו ידועים רק שני הפרמטרים הראשונים: בכל שנה נוצרים בשביל החלב כעשרה כוכבים, והחלק היחסי של הכוכבים הדומים לשמש (בהנחה שרק אלה מתאימים להתפתחות חיים) - כ- 10% מכל הכוכבים, לכן  $F_s \sim 0.1$ . עם הזמן השתנה המצב. גילוי כוכבי לכת סביב כוכבים רבים מאפשר להעריך כי כוכבי לכת הם תופעה נפוצה ביותר וככל הנראה לרוב הכוכבים יש כוכבי לכת, לכן  $F_p \sim 1$ . כמו כן, כפי שתואר לעיל, מהנתונים שנאספו על ידי טלסקופ קפלר נובע כי  $n_{hz} \sim 0.2-0.5$ . אם אמנם ייתכנו חיים על כוכבי לכת הסובבים ננסים אדומים גדלה ההערכה לפרמטר השני לערך של  $F_s \sim 0.9$ , כיון שאם נכליל בסוגי הכוכבים המתאימים להתפתחות חיים גם כוכבים הקטנים מן השמש כולל ננסים אדומים יכללו כ-90% מכל הכוכבים. מכאן נובע שכיום ניתן, בפעם הראשונה מאז נכתבה משוואת דרייק, להעריך את מכפלת הפרמטרים האסטרונומיים במשוואה:

$$R_b = R * F_s F_p n_{hz} \sim 0.2-5$$

למרות ההתקדמות המרשימה הזו, עדיין אין לנו מושג לגבי ערכם של שלושת הפרמטרים הביולוגיים-תרבותיים.

## משוואת דרייק המצומצמת לחיים פשוטים

במאמר על כוכבי לכת נושאי חיים (1) הצעתי לעקוף את אי הוודאות בפרמטרים התרבותיים במשוואת קפלר על ידי התמקדות בחיים ביולוגיים פשוטים (ביוטיים), כמו החיים שהתקיימו בכדור הארץ במשך רוב התקופה בה התקיימו בו חיים (החיים הראשונים הופיעו בכדור הארץ לפני כמעט ארבעה מיליארד שנה, בעוד חיים מורכבים הופיעו בכדור הארץ רק לפני כחצי מיליארד שנה). באנלוגיה למשוואת דרייק ניתן לכתוב גירסה מצומצמת של המשוואה, המתייחסת רק לחיים ולא לתרבות:

$$N_b = R_b F_b L_b.$$

באשר  $N_b$  הוא מספר כוכבי הלכת עם חיים ביוטיים בשביל החלב,  $R_b$  הוא מכפלת הגורמים האסטרונומיים המוגדרים לעיל ו-  $F_b$ , הפרמטר הביולוגי.  $L_b$  הוא משך הזמן הממוצע שבו מתקיימים חיים ביוטיים על פני כוכב לכת. מתוך הכרותנו את החיים בכדור הארץ סביר להניח כי  $L_b$  הוא מסדר גודל של מיליארדי שנים. את הפרמטר  $R_b$  ניתן להעריך, כאמור, מנתוני טלסקופ קפלר, ואת הפרמטר הביולוגי ניתן יהיה להעריך תוך שנים ספורות, עם הפעלתם של טלסקופי חלל מתקדמים ושיטות מחקר חדשות המתוארים בפרק הבא.

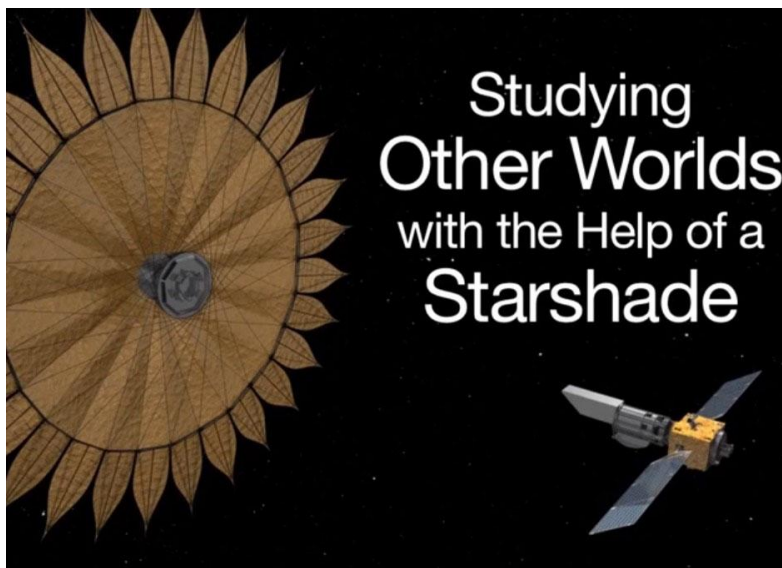
אף טרם השגת הערכה מקורבת לפרמטר הביולוגי ניתן לתחום את ערכו בין 1 - אם על פני כל כוכב לכת עם תנאים מתאימים להתפתחות חיים אךן מתפתחים חיים ביוטיים - לבין ערך קטן מאוד - נאמר 0.001 - אם למשל רק באחד מתוך אלף כוכבי לכת עם תנאים מתאימים אךן מתפתחים חיים ביוטיים. אם הפרמטר הביולוגי אךן נמצא בין שני גבולות אלו, מספר כוכבי הלכת עם חיים ביוטיים בשביל החלב יהיה בין מיליארדים (אם  $F_b \sim 1$ ) למיליונים (אם  $F_b \sim 0.001$ ). המרחק אל כוכב הלכת עם חיים ביוטיים הקרוב ביותר לכדור הארץ יהיה בין עשר למאה שנות אור, בהתאמה.

## חיפוש אחר סימני חיים בכוכבי לכת חוץ שמשיים

בניגוד לחקר סימני חיים בכוכבי הלכת של מערכת השמש כמו במאדים, לא ניתן לשגר חללית לכוכבי לכת חוץ שמשיים, כיון שבטכנולוגיית החלל העומדת לרשותנו כיום ימשך המסע אפילו לכוכב הקרוב ביותר, הנמצא במרחק של כארבע שנות אור, עשרות אלפי שנים. לכן עלינו להשתמש גם לצורך זה בשיטות עקיפות. החוקרים מקווים לבדוק האם קיימת פעילות ביוטית בכוכבי לכת חוץ שמשיים על ידי בדיקת ספקטראלית של אור כוכב האם המוחזר מן האטמוספירה של כוכבי הלכת. סימני בליעה על ידי אדי מים עשויים להעיד על קיום מים נוזלים על פני כוכב הלכת. חתימה ספקטראלית של חמצן יכולה להעיד על קיום פוטוסינתזה, כיון שחמצן חפשי הינו יסוד פעיל מבחינה כימית ונוטה להתרכב עם המינרלים שבקרקע ולהעלים מן האטמוספירה, אלא אם כן הוא נוצר מחדש בתהליכים אורגניים או אחרים. באטמוספירה של כדור הארץ לא היה חמצן כלל עד לפני כשני מיליארד שנה, אז החל להיווצר בפוטוסינתזה על ידי אצות כחוליות – ירוקות באוקיאנוסים. רק לפני פחות ממיליארד שנה הגיע ריכוז החמצן באטמוספירה לרמתו הנוכחית. סימן אפשרי נוסף לחיים הינו גז מתאן ( $CH_4$ ) הנוצר בתהליכי ריקבון, אך יכול גם להיווצר בתהליכים אי-אורגניים.

כדי לבדוק את הספקטרום של כוכבי לכת חוץ שמשיים יש לבודד את האור המוחזר מהם מן האור של כוכב האם שהוא בהיר פי מיליארד ויותר ונמצא סמוך מאוד (בזווית ראייה קטנה ביותר) לכוכבי הלכת שלו. הדבר דומה לניסיון להבחין בגרגיר אבק המרחף במרחק 10 ס"מ מזרקור של מגדלור הנמצא במרחק 20 ק"מ. עוצמת הטלסקופים הקיימים כיום עדיין אינה מאפשרת צילום ישיר ועל אחת כמה וכמה ניתוח ספקטראלי של כוכבי לכת חוץ שמשיים, אולם טלסקופים עתידיים בשילוב עם שיטות חדשניות יאפשרו ניתוח כזה בעתיד הקרוב. בשנת 2018 מתכננת נאס"א לשגר את יורשו של טלסקופ החלל הבל – JWST, עם מראה בקוטר של כ- 6.5 מ (בהשוואה ל-2.5 מ של הבל). סוכנות החלל האירופית מתכננת טלסקופ דומה בשם Magellan. לפי חישובים מוקדמים יהיו טלסקופים אלה מסוגלים לנתח את הספקטרום של כוכב לכת חוץ-שמשית בתנאים מסוימים (בשעת מעבר על פני כוכב האם), בתנאי שכוכב האם הוא כוכב קטן – ננס לבן או ננס אדום.

שיטה אחרת שתאפשר צילום ישיר ובדיקת הספקטרום של כוכבי לכת חוץ-שמשיים מבוססת על הסתרת כוכב האם על ידי דסקה אטומה שתרחף לפני טלסקופ חלל, תחסום את אורו של כוכב האם ותאפשר רק לאורו של כוכב הלכת להגיע לטלסקופ. פרויקט זה הנקרא בשם Starshade (8) מתוכנן ע"י נאס"א יאפשר את בדיקת הספקטרום גם בכוכבי לכת שאינם במעבר או סביב כוכבים שאינם ננסים אדומים, דוגמת השמש שלנו.



אם נחפש סימני חיים במדגם נבחר של כוכבי לכת חוץ שמשיים עם נתונים מבטיחים (כוכבי לכת ארציים באזור הישיב) גילוי סימני חיים, אפילו במספר קטן מביניהם יאפשר להעריך את הפרמטר הביולוגי  $F_b$ . נניח לדוגמא כי מתוך מדגם של מאה כוכבי לכת מתאימים יתגלו סימני חיים בעשרה, אזי ניתן יהיה להעריך ש  $F_b \sim 0.1$ . מאידך, אם לא יתגלו סימני חיים אף בכוכב אחד מתוך המאה, ניתן יהיה להעריך כי  $F_b < 0.01$ .

## חיפוש אחר שידורים תבוניים

לגילוי חיים על פני כוכבי לכת חוץ-שמשיים תהיה חשיבות עצומה הן מבחינת האומדן של שכילות החיים הביולוגיים ביקום והן ב סיוע להבנת התפתחות החיים על פני כדור הארץ, אולם הישג גדול ומרגשת אף יותר יהיה גילוי חיים תבוניים. זוהי מטרת פרויקט SETI, המנסה מאז 1960 לגלות שידורי רדיו מתרבויות אחרות, עד כה ללא הצלחה (וראו "האם יש שם מישהו?" מאת עמרי ונדל, גלילאו 144, 32, 2010).

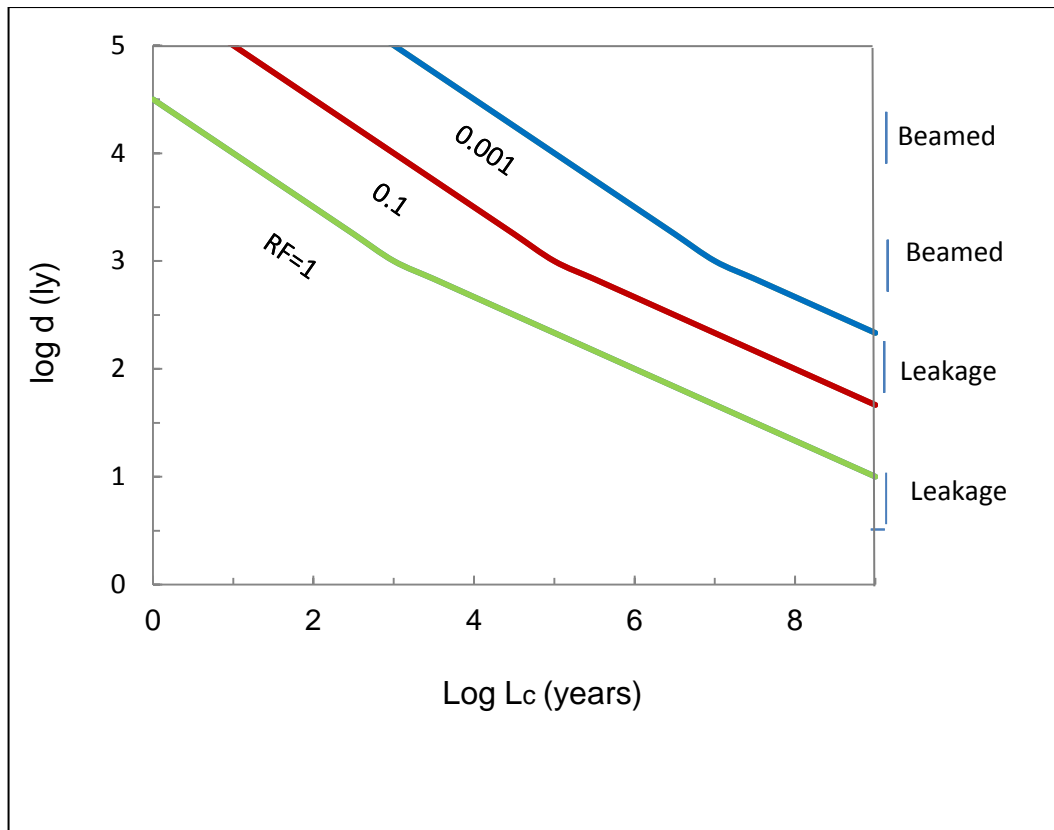
ניתן לחשב את המרחק המסתבר לתרבויות הקרובות, אם ישנן כאלה, בצורה דומה לחישוב שתואר לעיל לגבי חיים ביוטיים, בעזרת משוואת דרייק המלאה שלעיל, שבה נוסף הפרמטר התרבותי,  $F_c$  (ההסתברות להתפתחות תרבות עם טכנולוגיית רדיו בכוכב לכת ביוטי), והפרמטר  $L_b$  מוחלף ב-L, זמן הפעילות הממוצע של תרבויות רדיו. בניגוד לחיים ביוטיים העשויים להתקיים מיליארדי שנים, ישנן סיבות רבות העלולות להגביל את משך פעילות הרדיו של תרבויות – החל בהרס התרבות בשל גורמים חיצוניים (אסון אסטרונומי כמו פגיעת אסטרואיד) או פנימיים (מלחמות או פגיעה אקולוגית חמורה) ועד מעבר לשיטות תקשורת שאינן פולטות גלי רדיו כגון סיבים אופטיים. המרחק המסתבר לתרבויות הרדיו הקרובות ביותר אלינו יהיה (1):

$$d \sim 2000 (R_b F_b F_c L / 1000)^{-1/3}$$

כאשר  $d$  הוא המרחק בשנות אור והפרמטרים באגף ימין מוגדרים בפרק על משוואת דרייק<sup>1</sup>. לדוגמא, אם  $R_b F_b F_c \sim 1$ , ומשך תקופת השידור של תרבות הוא 1000 שנה במוצע, אזי המרחק המסתבר לתרבות המשדרת בקרובה ביותר הוא 2000 שנות אור.

המרחק המרבי ממנו ניתן לקלוט תשדורות רדיו מתרבות טכנולוגית תלוי באופי התשדורות. שידורי הרדיו והטלביזיה שלנו חודרים את האטמוספירה ומתפזרים בחלל. בהנחה שתרבות טכנולוגית משתמשת בתקשורת רדיו בעוצמה הדומה לזו של התרבות שלנו ניתן לחשב את טווח הקליטה. טווח הקליטה תלוי כמובן גם ברגישות המקלט. טלסקופ הרדיו הגדול בעולם הנמצא ליד העיר Arecibo שבפורטו ריקו, מסוגל לקלוט אות בעוצמת אות הזליגה של כדור הארץ, ממרחק שאינו עולה על שני אור בודדות. שידורי התקשורת שלנו מיועדים להתפזר לכל הכיוונים כדי להגיע לכמה שיותר מאזינים, ולכן מתפזרים בחלל בכל הכיוונים ועוצמת האות יורד עם המרחק בצורה חדה. לעומת זאת, לו שידרנו קרן לייזר, או אות רדיו ממוקד, הייתה עוצמת שידור נתונה מגיעה למרחקים גדולים הרבה יותר. לדוגמא, שידור ממוקד בעוצמה הדומה לזו שמשדר המכ"מ של טלסקופ ארסיבו, יוכל להיקלט על ידי טלסקופ רדיו הדומה לטלסקופ ארסיבו ממרחק של אלפי שנות אור. טלסקופי רדיו עתידיים דוגמת מערך הטלסקופים SKA (Square Kilometer Array, (9)) יוכלו לקלוט אות זליגה או אות מכ"מ של מגדל פיקוח בשדה תעופה ממרחק של עשרות שנות אור, ואות ממוקד בעוצמת ארסיבו ממרחק של עשרות אלפי שנות אור.

<sup>1</sup> אם תוכן הסוגריים באגף ימין גדול מ-1 החזקה משתנה ל-1/2 בשל הגיאומטריה של שביל החלב.



המרחק המסתבר לתרבות הקרובה לעומת אורך החיים של תרבות תקשורתית מקור - Wandel (1) 2015

בתרשים מופיע המרחק  $d$  המסתבר לתרבויות הרדיו הקרובות אלינו בתלות במשך תקופת השידור הממוצע של תרבויות,  $L$ . שלוש העקומות הן עבור ערכים שונים של המכפלה  $RF=R_b F_b$  בציר המאונך הימני מופיעים מרחקי קליטה אופייניים כפי שתואר לעיל. ניתן לראות שאף בהנחות האופטימיות ביותר לגבי הפרמטרים האסטרונומיים, הביולוגי והתרבותי ( $RF=10$ ), לא ניתן לגלות אות זליגה בטכנולוגיה הקיימת, וגם ברדיו טלסקופים העתידיים ניתן יהיה לגלות אות כזה רק אם משך תקופת השידור הממוצע הינו לפחות מיליוני שנים. אם השידור ממוקד ומכוון אלינו הטווח גדול יותר אבל אין כל ודאות שתרבויות אכן יכוונו שידורים כאלה לכיווננו, וגם אז נדרש שידור ממוקד המכוון אל כדור ארץ במשך שנים רבות. אי קיומם של שני תנאים אלה עשוי להסביר את חוסר ההצלחה של פרויקט SETI עד כה, ואף להטיל ספק בסיכויי הצלחתו בעתיד.

## להרחבה

(1) Wandel, A. 2015, International Journal of Astrobiology, 14, pp. 611-615.

<http://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1412/1412.1302.pdf>

(2) <http://kepler.nasa.gov/>

(3) Petigura, E.A., Howard, A.W., Marcy, G.W., 2013, PNAS, 110, pp. 19273-19278.

(4) Tarter, J.C., Peter R., Backus, P.R., Mancinelli et al. 2007, Astrobiology, 7, pp. 30-65



(5) Gale, J. and Wandel, A. 2015, International Journal of Astrobiology, in press  
<http://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1510/1510.03484.pdf>

(6) Dressing, C.D. and Charbonneau, D. 2013, Astrophysical Journal 767, 95-115

(7) <http://tess.gsfc.nasa.gov/>

(8) [http://en.wikipedia.org/wiki/New\\_Worlds\\_Mission](http://en.wikipedia.org/wiki/New_Worlds_Mission)

(9) <https://www.skatelescope.org>

---

**עמרי ונדל** הוא פרופ' לאסטרופיסיקה, יוצר ומרצה הקורס "אסטרופיסיקה והחיים ביקום" באוניברסיטה העברית בירושלים, חוקר חורים שחורים, גלקסיות פעילות, אסטרוביולוגיה וכוכבי לכת מחוץ למערכת השמש.

---