תרגום לעברית של המאמר שפורסם באנגלית. אינו מהדורה מאושרת של כתב העת.

מבוך האילוצים של מערכת השמש: מבוי סתום מדעי החושף את המכונה הבין-יקומית

Yarel A*

המחלקה לאסטרונומיה ולפיזיקת החלל, Alien-Science Association of Astronomy Org.il, ישראל

מאמר מחקר · כרך 3, גיליון 2
התקבל: 16 בדצמבר 2025 · פורסם: 24 בדצמבר 2025
DOI: 10.23880/oaja-16000167

מחבר להתכתבות: Alon Yarel, Department of Astronomy & Space Physics, Alien-Science Association of Astronomy Org.il, Aliyat Hanoar 9, Kiryat Shmona, P.O. 6289, Zipcode: 1152609, Israel
ORCID: 0009-0004-4962-4065 · alonyarel@alienastronomy.com
www.alienastronomy.com/home

תקציר

רקע: עצירות בדקלינציית השמש, שאריות גרבימטריות חצי-שנתיות של GRACE וזרימות יוצאות ממוגנטות בעלות מבנה סלילי בסביבות כוכביות נידונות בדרך כלל כתופעות שאינן קשורות זו לזו. כל אחת מהן נמדדת היטב ומבוססת, אך במסגרת ההליופיזיקה והגאודזיה המקובלות אין להן פרשנות פיזיקלית מאוחדת.

מטרות: אנו בוחנים אם ניתן לפרש את שלוש התופעות האלה - ההתנהגות הגאומטרית של הדקלינציה, האותות הגרבימטריים החצי-שנתיים והזרימות הסליליות ההשראתיות בקנה מידה גדול - כביטויים בלתי תלויים של שדה חיצוני חלש יחיד הפועל על מערכת כדור הארץ והשמש, ואם שדה כזה מחייב מחלקה מוגבלת של מבנים בקנה מידה גדול.

שיטות: אנו פועלים בארבעה שלבים. ראשית, אנו גוזרים קו בסיס גאומטרי טהור לדקלינציית השמש ומכמתים את התנהגות העצירה בקרבת נקודות ההיפוך כאשר נטיית הציר קבועה. שנית, אנו מפרקים את השארית החצי-שנתית של GRACE לאחר תיקוני מערכת כדור הארץ, ובוחנים את יחס המופע שלה לשאריות הדקלינציה ביחס לקו הבסיס הגאומטרי. שלישית, אנו בונים מודל שמרני של שדה חיצוני אפקטיבי העולה בקנה אחד עם שני מערכי הנתונים, ומעריכים את מומנט הכוח הנדרש. רביעית, אנו מנתחים את מאזני האנרגיה והתנע הזוויתי של מבנים אסטרופיזיקליים מועמדים כדי לזהות אילו מהם יכולים ליצור שדה בעל הסימטריה, הגודל והיציבות שהוסקו.

תוצאות: הגזירה הגאומטרית מוכיחה שעצירות הדקלינציה נובעות אך ורק מאפקטי היטל כאשר נטיית הציר קבועה, ומספקת קו בסיס נקי שלעומתו אפשר למדוד שאריות קטנות. כאשר מחסרים את קו הבסיס הזה מנתוני הדקלינציה הנצפים, השאריות מציגות רכיב חצי-שנתי המתואם במופע עם השארית החצי-שנתית של GRACE ויציב בחלונות זמן רב-שנתיים. התאמת המשרעות מצביעה על מומנט כוח חיצוני מסדר גודל של 10^{17} N m. ניתוח כללי של שדה אפקטיבי מראה כי מבני פלזמה השראתיים, ממוגנטים באופן סלילי ומיושרים צירית, יכולים ליצור מומנט כוח בעל הסימטריה, הגודל והיציבות ארוכת הטווח הנדרשים, תוך התאמה לאילוצים על סיבוב כדור הארץ ועל מסלולו.

מסקנות: במסגרת זו, הגאומטריה של השמש, הגרבימטריה של GRACE ודינמיקת MHD סלילית השראתית מתגלות כשלושה ביטויים תצפיתיים של מומנט כוח חיצוני חלש יחיד הפועל על מערכת כדור הארץ והשמש. אילוצי השדה האפקטיבי מגדירים "מבוך אילוצים" סגור שבו המודלים המקובלים מגיעים למבוי סתום מדעי, ומרחב הפרמטרים המותר מצטמצם למחלקה קטנה של מבנים סליליים השראתיים. מימוש אפשרי אחד שלה תואם למה שכונה המכונה הבין-יקומית.

מילות מפתח: שמש: שדות מגנטיים; כבידה; כדור הארץ; מערכות פלנטריות; מגנטוהידרודינמיקה (MHD); שיטות: אנליטיות; גאודזיה חללית

Copyright © Yarel A

קיצור

MHD: מגנטוהידרודינמיקה.

מבוא

מסגור מאוחד זה באמצעות שדה אפקטיבי, של שאריות גרבימטריות חצי-שנתיות, קווי בסיס של גאומטריית הדקלינציה ומבנים סליליים השראתיים, הוצג לראשונה בידי המחבר Yarel A במקור [1].

באסטרופיזיקה ובגאודזיה החללית המודרניות נהוג להתייחס לחימום עטרת השמש, לסילונים קדם-כוכביים ולשינויים בזמן בשדה הכבידה כמשתייכים לתת-תחומים נפרדים. בפועל, עם זאת, הם מציגים דפוסים מבניים דומים להפליא: זרימות יוצאות סליליות דו-קוטביות הנובעות מאזורים קומפקטיים, שדות מגנטיים חזקים המצומדים לפלזמה מוליכה, אותות חצי-שנתיים ממושכים בסדרות זמן של כבידה, ודפוסים גאומטריים בתנועתה הנראית של השמש. כאשר בוחנים תופעות אלו יחד, הן יוצרות "מבוך" הדוק של דרישות תצפיתיות שכל מודל פיזיקלי מאוחד חייב לקיים.

בהיבט ההליופיזיקלי, עטרת השמש מגיעה לטמפרטורות $T \gtrsim 10^6$ K, הגבוהות ביותר משני סדרי גודל מטמפרטורת הפוטוספרה, למרות היעדר מסלול פשוט של קרינה או הולכה לחימום כזה. הדינמיקה הנלווית בקנה מידה גדול בפנים השמש, הכוללת סיבוב דיפרנציאלי ויצירת שדה טורואידלי, מספקת הקשר חיוני להעברת אנרגיה מגנטית [2,3]. בהיבט הגאודטי, משימות GRACE ו-GRACE-FO חשפו רכיב חצי-שנתי מבוסס בשדה הכבידה של כדור הארץ, הנשאר לאחר תיקונים הידרולוגיים, אטמוספריים, קריוספריים ואוקייניים מקובלים [4,5].

מבחינה גאומטרית, דקלינציית השמש מציגה "עצירות" בנות כמה ימים בקרבת נקודות ההיפוך, המתפרשות לעיתים בטעות כראיה לשינויים קצרי טווח בנטיית ציר כדור הארץ. בקני המידה של קדם-כוכבים ושל עצמים קומפקטיים נצפות זרימות יוצאות דו-קוטביות ממוקדות מאוד ומבנים ממוגנטים סליליים, הנושאים לעיתים קרובות שטפי אנרגיה מגנטית המאתגרים תרחישים המונעים אך ורק בספיחה [6,7].

העבודה הנוכחית שואלת שאלה שמרנית אך יסודית: האם אפשר להבין תופעות שונות לכאורה אלה כביטויים בלתי תלויים של שדה חיצוני חלש יחיד הפועל על מערכת כדור הארץ והשמש? איננו מניחים פיזיקה יסודית חדשה; אנו מאמצים נקודת מבט של שדה אפקטיבי, שבה כל תרומה נוספת לסביבה הכבידתית-אלקטרומגנטית של מערכת השמש יכולה להיות מקודדת בפוטנציאל Φ_{eff}, המשלים את הפוטנציאל הניוטוני המקובל. לאחר מכן אנו שואלים איזו צורה על פוטנציאל זה לקבל כדי לקיים את האילוצים הגאומטריים והגרבימטריים המשולבים. הדרישות המתקבלות מחמירות במידה המגדירה מבוך אילוצים סגור; בתוך מבוך זה, התיאורים המקובלים של ההליופיזיקה והגאודזיה מגיעים למבוי סתום מדעי, אלא אם מוכנס מבנה נוסף בקנה מידה גדול.

אנו פועלים בארבעה שלבים:

- אנו בוחנים מחדש את הגאומטריה של דקלינציית השמש ומבססים בקפדנות את קביעות נטיית ציר כדור הארץ בקני זמן עונתיים, ובכך מכמתים את התנהגות העצירה הצפויה.
- אנו מנתחים את השארית החצי-שנתית של GRACE ואת יחס המופע שלה לשאריות הדקלינציה לאחר חיסור קו הבסיס הגאומטרי.
- אנו בונים מודל כללי של שדה חיצוני אפקטיבי העולה בקנה אחד עם תצפיות אלו, וגוזרים את משרעת מומנט הכוח הנדרשת.
- אנו בוחנים אילו מחלקות של מבנים אסטרופיזיקליים מוכרים יכולות ליצור שדה כזה, ומראים שרק מבני פלזמה השראתיים ממוגנטים סלילית בקנה מידה גדול תואמים את כל האילוצים.

רק בשלב האחרון הזה הדיון נוגע במושג הספקולטיבי של מבנה השראתי בקנה מידה גדול החוצה יקומים, שכונה בעבר המכונה הבין-יקומית [1]. מטרתנו אינה לקדם תרחיש קוסמולוגי מסוים, אלא להראות שלאחר החלת האילוצים התצפיתיים והגאומטריים, מרחב הפרמטרים המותר לשדה החיצוני מצטמצם למחלקה צרה מאוד של מימושים פיזיקליים.

ניתוח גאומטרי של עצירות דקלינציית השמש

דקלינציית השמש δ מוגדרת כזווית שבין קרני השמש לבין מישור קו המשווה של כדור הארץ. עבור מערכת גאומטרית טהורה של כדור הארץ והשמש, בעלת נטיית ציר קבועה ε, ובהזנחת הפרעות, הדקלינציה מתפתחת לפי

$$\delta(t) = \arcsin\left[\sin\ \varepsilon\ \sin\ \lambda(t)\right] \qquad (1)$$

כאשר $\lambda(t)$ הוא האורך האקליפטי של השמש. ביטוי זה אינו מכיל דרגת חופש לשינוי קצר טווח בנטיית הציר; התלות בזמן נכנסת רק דרך $\lambda(t)$, המתקדם כמעט באופן אחיד לאורך מישור המילקה.

גזירת משוואה (1) לפי הזמן נותנת

$$\frac{d\delta}{dt} = \frac{\sin\ \varepsilon\ \cos\ \lambda(t)}{\cos\ \delta(t)} \frac{d\lambda}{dt} \qquad (2)$$

בקרבת נקודות ההיפוך, $\lambda \approx 90°$ או $270°$, ולכן $\cos\lambda \approx 0$.

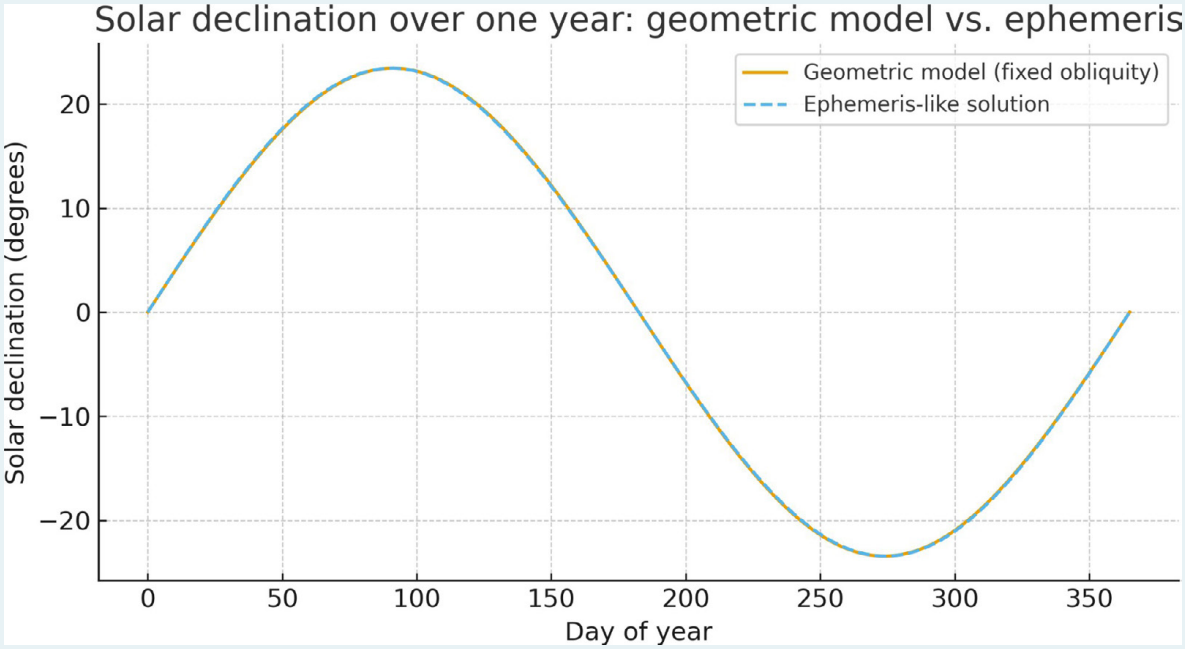
$$\frac{d\delta}{dt} \approx 0 \qquad (3)$$

לפיכך, גם כאשר ε קבועה לחלוטין. ה"עצירה" הנצפית בת כמה הימים של הדקלינציה בקרבת נקודות ההיפוך נובעת אפוא מאפקט היטל גאומטרי טהור, ואינה מחייבת שינוי קצר טווח כלשהו בנטיית ציר כדור הארץ.

כדי לכמת את השינוי האיטי בקרבת נקודת ההיפוך, אנו מפתחים את משוואה (1) סביב $\lambda = 90°$, וכותבים (איור 1)

Copyright © Yarel A

$$\lambda = 90^\circ + \Delta\lambda, \quad (4)$$



איור 1: דקלינציית השמש לאורך שנה אחת כפונקציה של היום בשנה. העקומות הרציפה והמקווקוות ממחישות את ההתאמה הקרובה בין מודל גאומטרי בעל נטיית ציר קבועה לבין פתרון דמוי אפמריס, ומדגישות את התנהגות העצירה בקרבת נקודות ההיפוך. העקומה מספקת את קו הבסיס $\delta_{geom}(t)$ המשמש להגדרת השארית $\Delta\delta_{res}(t)$.

הגרף המקורי נשמר ללא שינוי; הכיתוב שמתחתיו מתורגם. מקרא: יום בשנה; דקלינציית השמש (מעלות); מודל גאומטרי (נטיית ציר קבועה); פתרון דמוי אפמריס.

כאשר $\Delta\lambda$ קטן (ברדיאנים). באמצעות $\sin(90^\circ + \Delta\lambda) = \cos\Delta\lambda \approx 1 - \Delta\lambda^2/2$, מתקבל

$$\delta(\lambda) \approx \arcsin\left(\sin\varepsilon - \frac{1}{2}\sin\varepsilon\Delta\lambda^2\right) \quad (5)$$

בפיתוח הארקסינוס סביב $x_0 = \sin\varepsilon$, ובשימוש ב-$\arcsin x_0 = \varepsilon$ וב-$(d \arcsin x/dx)|_{x_0} = 1/\cos\varepsilon$, אנו מקבלים

$$\delta(\lambda) \approx \varepsilon - \frac{\tan\varepsilon}{2}\Delta\lambda^2 \quad (6)$$

נסמן את המהירות הזוויתית המסלולית הממוצעת של כדור הארץ כך

$$\omega = \frac{2\pi}{365} rad\ day^{-1} \quad (7)$$

כך ש-$\Delta\lambda = \omega\,\Delta t$, כאשר Δt הוא מספר הימים מנקודת ההיפוך המדויקת. הצבה במשוואה (6) נותנת

$$\Delta\delta \equiv \delta - \varepsilon \approx -\frac{\tan\varepsilon}{2}(\omega\Delta t)^2 \quad (8)$$

עבור $\varepsilon \simeq 23.44^\circ$, מתקבל

$$|\Delta\delta| \approx 0.0037^\circ (\Delta t)^2, \quad (9)$$

כך ש-

$$\Delta t = 2days \Rightarrow |\Delta\delta| \approx 0.015^\circ, \quad (10)$$

$$\Delta t = 3days \Rightarrow |\Delta\delta| \approx 0.033^\circ, \quad (11)$$

$$\Delta t = 4days \Rightarrow |\Delta\delta| \approx 0.059^\circ. \quad (12)$$

שינויים אלה קטנים בהרבה מהעיגול ל-0.1° המשמש בדרך כלל בטבלאות דקלינציה, ומסבירים במלואו את מראית העין של הפסקה ממושכת בערכים המופיעים בטבלה.

בפועל, אפשר לחשב את הביטוי במשוואה (1) באמצעות אפמריס שמש בדיוק גבוה, כדי ליצור עקומת ייחוס גאומטרית טהורה $\delta_{geom}(t)$, שאליה אפשר להשוות את ערכי הדקלינציה הנצפים $\delta_{obs}(t)$. אנו מגדירים את שארית הדקלינציה כך

$$\Delta\delta_{res}(t) = \delta_{obs}(t) - \delta_{geom}(t) \quad (13)$$

כל מבנה מובהק סטטיסטית ב-$\Delta\delta_{res}(t)$, מעבר להתנהגות העצירה הריבועית המקודדת במשוואה (8), עשוי להתפרש כראיה להפרעות נוספות, ובהן, אך לא רק, מומנטי כוח חיצוניים חלשים.

Copyright © Yarel A

אנו מסיקים שהתבנית הנצפית של שינויי דקלינציה מהירים בקרבת נקודות השוויון ושל עצירות לכאורה בנות 3-4 ימים בנקודות ההיפוך מוסברת במלואה באמצעות המודל הגאומטרי המקובל בעל נטיית הציר הקבועה.

אין צורך במומנט כוח חיצוני, בהשפעה כבידתית חריגה או בשינוי בנטיית ציר כדור הארץ כדי לשחזר מאפיינים אלו. בד בבד, המודל הגאומטרי מספק קו בסיס נקי שלעומתו אפשר לחפש סטיות עדינות כלשהן, העשויות לנבוע ממומנטי כוח חיצוניים חלשים.

אות GRACE חצי-שנתי כחתימה גרבימטרית

משימות GRACE ו-GRACE-FO סיפקו יותר משני עשורים של מדידות בדיוק גבוה של שינויים בזמן בשדה הכבידה של כדור הארץ [4,5]. לאחר תיקונים מקובלים לפיזור מחדש של מסה הידרולוגית, אטמוספרית, קריוספרית ואוקיינית, אות הכבידה השאריתי מכיל רכיב חצי-שנתי מתמשך. אפשר לייצג רכיב זה באופן סכמטי כך

$$g_{res}(t) = A_{6m}\sin\left(\omega_{6m}t + \phi_g\right) + \mathcal{O} \quad \text{(annual, noise)}, \quad (14)$$

כאשר A_{6m} היא המשרעת החצי-שנתית, $\omega_{6m} = 2\omega_{annual}$, ו-$\varphi_g$ הוא המופע הנצפה ביחס לנקודת השוויון.

מבחינה אמפירית, המופע החצי-שנתי מתואם היטב עם נקודות הקיצון בדקלינציית השמש, כאשר מתאימים לה אפנון חצי-שנתי קטן על גבי המודל הגאומטרי הטהור. באופן שקול, אפשר לפרק את שארית הדקלינציה $\Delta\delta_{res}(t)$ המוגדרת במשוואה (13) כך

$$\Delta\delta_{res}(t) \approx B_{6m}sin\left(\omega_{6m}t + \phi_\delta\right) + \ldots, \quad (15)$$

כאשר $\varphi_\delta \approx \varphi_g$ בתחום אי-הוודאות.

קוהרנטיות מופע זו בין $\Delta\delta_{res}(t)$ לבין $g_{res}(t)$ אינה מוסברת בקלות באמצעות תהליכים פנימיים במערכת כדור הארץ בלבד, העוקבים בדרך כלל אחר אילוץ הידרולוגי הנשלט בידי מחזור שנתי. לעומת זאת, מומנט כוח חיצוני מחזורי, כבידתי או גרביטו-אלקטרומגנטי, הפועל על מערכת כדור הארץ והשמש, ייצור באופן טבעי חתימה חצי-שנתית הן בגדלים הגאומטריים הנצפים (דקלינציה) והן בגדלים הגרבימטריים הנצפים (GRACE).

כדי למדל זאת, אנו בוחנים מומנט כוח חלש $\tau(t)$ בעל מחזוריות חצי-שנתית:

$$\tau(t) = \tau_0 sin\left(\omega_{6m}t + \phi_\tau\right) \quad (16)$$

מומנט כוח זה גורם להפרעה קטנה בתנע הזוויתי המסלולי של כדור הארץ, L:

$$\frac{d\Delta L}{dt} = \tau(t) \quad (17)$$

כך ש-

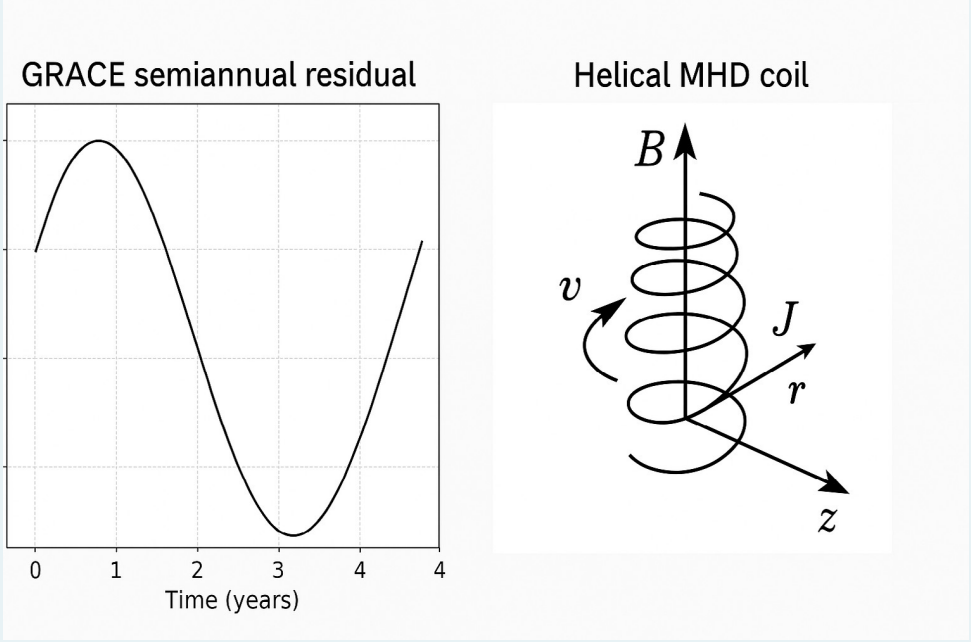
$$\Delta L(t) \propto -\frac{\tau_0}{\omega_{6m}}\cos\left(\omega_{6m}t + \phi_\tau\right) \quad (18)$$

התאמת משרעת GRACE הנצפית למשרעת האפנון הגאומטרי בשארית הדקלינציה נותנת הערכה עקבית למומנט הכוח העומד בבסיס התופעה, מסדר גודל

$$\tau_0 \sim 10^{17}\,Nm \quad (19)$$

הנקודה העיקרית היא שלאחר הסרת התרומות המקובלות של מערכת כדור הארץ, נשארת חתימה חצי-שנתית קוהרנטית הנעולה במופע לשארית דקלינציית השמש. תיאור באמצעות שדה חיצוני אפקטיבי מספק שפה טבעית לקידוד השפעה שאריתית זו (איור 2, טבלאות 1 ו-2).

Copyright © Yarel A



איור 2: רכיב חצי-שנתי סכמטי של סדרת זמן של שארית גרבימטרית, הממחיש התנהגות סינוסואידלית בסיסית בתדירות $2\omega_{annual}$ ובמופע ϕ_g. המשרעת A_{6m} והמופע נבחרו כך שיתאימו לרכיב החצי-שנתי של שארית GRACE לאחר תיקונים מקובלים, כפי שהוא מיוצג במשוואה (14).

הגרף המקורי נשמר ללא שינוי; הכיתוב שמתחתיו מתורגם. מקרא באיור: שארית GRACE חצי-שנתית; זמן (שנים); סליל MHD סלילי.

סדרה	A_{6m}	$\sigma(A_{6m})$	ϕ	$\sigma(\phi)$
Mascon	0.927	0.129	2.902	0.137
GOMA	1.006	0.272	-2.565	0.268
דקלינציה	0.381	0.001	2.137	0.002

טבלה 1: פרמטרי ההתאמה החצי-שנתית ממשוואה (20). המופעים ϕ מדווחים ברדיאנים לפי אותה מוסכמת ייחוס ששימשה בהתאמה.

זוג	$f\ [yr^{-1}]$	C^2	p
Mascon לעומת שארית הדקלינציה	2.0625	0.683	0.12
Mascon לעומת GOMA (SHC)	2.0625	0.544	0.073

טבלה 2: קוהרנטיות בתדירות החצי-שנתית וערכי p המבוססים על סדרות חלופיות.

התאמה חצי-שנתית ואי-ודאויות

לכל סדרה $y(t)$, כאשר הזמן t נמדד בשנים, מותאם אותו מודל הרמוני:

$$y(t) = c_0 + c_1 t + a_1 \sin(2\pi t) + b_1 \cos(2\pi t) + a_2 \sin(4\pi t) + b_2 \cos(4\pi t) \quad (20)$$

כאשר הזוג (a_2, b_2) מקודד את הרכיב החצי-שנתי. אנו מדווחים על המשרעת החצי-שנתית A_{6m} ועל המופע ϕ באמצעות

$$A_{6m} = \sqrt{a_2^2 + b_2^2}, \quad \phi = a\tan 2(b_2, a_2) \quad (21)$$

- **בדיקת קוהרנטיות מופע:** אנו בודקים את השערת האפס H_0, שלפיה לא קיים יחס חצי-שנתי נעול מופע בין הגדלים הנצפים לאחר התיקונים המקובלים, תוך שימוש במימושים חלופיים לקבלת ערכי p ב-$f \simeq 2\ yr^{-1}$. כדי להעריך אם הרכיבים החצי-שנתיים קוהרנטיים במופע בין הגדלים הנצפים, אנו מחשבים את ריבוע גודל הקוהרנטיות $C^2(f)$ בתדירות החצי-שנתית בין זוגות סדרות, ומעריכים מובהקות ביחס למודל האפס המבוסס על המימושים החלופיים.
- **יציבות המופע לאורך תקופות:** כדי להעריך אם יחס המופע החצי-שנתי שהוסק יציב לאורך זמן ואינו נשלט בידי תקופה אחת, אנו חוזרים על ההתאמה ההרמונית של משוואה (20) בחלונות נעים בני 6 שנים, המתקדמים בצעדים של שנה אחת, באמצעות הסדרות החודשיות המיושרות. עבור Mascon לעומת שארית הדקלינציה, הפרש המופע העטוף $\Delta\varphi = \varphi_{Mascon} - \varphi_{\Delta\delta}$ נשאר חסום, עם ממוצע $\Delta\varphi = 0.85$ rad וסטיית תקן 0.20 rad לאורך $N = 18$ חלונות, דבר המצביע על כך שהתיאום החצי-שנתי אינו תוצר מלאכותי של חלון יחיד.

מודל שמרני של שדה חיצוני אפקטיבי

כעת אנו מציגים שדה אפקטיבי שמרני Φ_{eff} המשלים את הפוטנציאל הכבידתי הניוטוני המקובל. לפי בנייתו, שדה זה מקודד כל השפעה נוספת, כבידתית, אלקטרומגנטית או משולבת, הניתנת לייצוג ברמת פוטנציאל אפקטיבי.

אנו כותבים את הפוטנציאל הכולל כך

$$\Phi_{tot} = \Phi_N + \Phi_{eff} \quad (22)$$

Copyright © Yarel A

כאשר Φ_N הוא הפוטנציאל הניוטוני הרגיל של השמש, כוכבי הלכת וגופים מקובלים אחרים, ו-Φ_{eff} הוא תיקון קטן שצורתו הפונקציונלית טעונה קביעה. התאוצה האפקטיבית היא אפוא

$$a_{eff} = -\nabla\Phi_{eff} . \qquad (23)$$

האילוצים הגאומטריים והגרבימטריים המשולבים מציבים את הדרישות הבאות עבור Φ_{eff}:

- **מחזוריות חצי-שנתית:** לשאריות הנצפות יש תדירות $2\omega_{annual}$, ולכן השדה חייב לגרום למומנט כוח בעל אותה מחזוריות.
- **יישור צירי:** יחס המופע עם דקלינציית השמש מצביע על כך שהשדה האפקטיבי מיושר עם ציר הסיבוב של השמש, או לפחות מיוחס אליו (השוו למבנה הסיבוב של השמש בקנה מידה גדול; (מחבר: Thompson MJ [4], Beck JG [5]).
- **גודל חלש:** סדר הגודל של מומנט הכוח במשוואה (19) קטן דיו כדי להימנע משינויים בני גילוי בסיבוב כדור הארץ, אך גדול דיו כדי להותיר חותם ב-GRACE.
- **יציבות ארוכת טווח:** קוהרנטיות המופע לאורך שנים רבות מחייבת מקור יציב בקני זמן של עשורים.
- **סלילים והעברת תנע זוויתי:** השדה חייב להתאים למנגנון המעביר תנע זוויתי באופן טבעי ושומר על ציר מועדף, כפי שמתרחש בזרימות יוצאות ממוגנטות סלילית [6].

אפשר לכתוב ייצוג פנומנולוגי מינימלי המקיים את שני התנאים הראשונים כך

$$\Phi_{eff}(r,\lambda) = \Phi_0(r) + \epsilon r^{-n} cos\left(2\lambda(t) + \phi\right) \qquad (24)$$

כאשר $\Phi_0(r)$ הוא תרומה בעלת סימטריה צירית, $n > 0$ מקודד את הדעיכה הרדיאלית, ϵ היא משרעת קטנה וחסרת ממדים, ו-ϕ הוא היסט מופע הנקבע לפי הכיוון היחסי של השדה האפקטיבי ומישור המילקה.

מומנט הכוח התואם הפועל על מערכת כדור הארץ והשמש מתנהג בקנה המידה הבא

$$\tau(t) \sim \epsilon\, r^{-n} sin\left(2\lambda(t) + \phi\right) \qquad (25)$$

מבני MHD סליליים כמימוש הטבעי

בפלזמות אסטרופיזיקליות נפוצים מבנים ממוגנטים סלילית בקנה מידה גדול. הם מופיעים בסילונים קדם-כוכביים, בגרעינים גלקטיים פעילים, במערכות כפולות הפולטות קרני X ובמערכות אחרות שבהן סיבוב, שדות מגנטיים וזרימות יוצאות מקיימים אינטראקציה [6,7]. מבנים כאלה יעילים בהעברת תנע זוויתי וביצירת שדות מסודרים ונרחבים; בהקשרים של עצמים קומפקטיים, מנגנוני חילוץ אלקטרומגנטיים מספקים אמות מידה מועילות למאזני האנרגיה של זרימות יוצאות המתווכות מגנטית [8].

מודל פשוט לצינור שטף מגנטוהידרודינמי (MHD) סלילי משתמש בקואורדינטות גליליות (r, φ, z) וכותב את השדה המגנטי כך

$$B(r) = B_z(r)\hat{z} + B_\varphi(r)\hat{\varphi} \qquad (26)$$

כאשר B_z ו-B_φ הם הרכיבים הצירי והטורואידלי, בהתאמה. באופן דומה אפשר לכתוב את שדה מהירות הפלזמה כך

$$v(r) = v_z(r)\hat{z} + v_\varphi(r)\hat{\varphi} \qquad (27)$$

משוואת ההשראה עבור פלזמה מוליכה בעלת דיפוזיביות מגנטית η היא

$$\frac{\partial B}{\partial t} = \nabla\times\left(v\times B - \eta\nabla\times B\right), \qquad (28)$$

כאשר η היא הדיפוזיביות המגנטית. עבור זרימה סלילית בעלת מהירות צירית v_z ומהירות אזימוטלית v_φ, המכפלה הווקטורית $v \times B$ מקבלת רכיב רדיאלי

$$\left(v\times B\right)_r = v_z B_\varphi - v_\varphi B_z, \qquad (29)$$

התואם שדה חשמלי השראתי רדיאלי

$$E_r = -\left(v\times B\right)_r = -\left(v_z B_\varphi - v_\varphi B_z\right). \qquad (30)$$

אותו מבנה סלילי המעביר אנרגיה ושטף מגנטי מעביר גם תנע זוויתי. אפשר לכתוב באופן סכמטי את מומנט הכוח המגנטי שצינור השטף מפעיל על סביבתו כך

$$\tau_{MHD} \sim \int r\, J_\varphi\, B_z\, dA \qquad (31)$$

בעל הסימטריה החצי-שנתית המדויקת הנדרשת במשוואה (16). הבעיה מצטמצמת אפוא לזיהוי מבנים פיזיקליים היכולים ליצור פוטנציאל מהצורה של משוואה (24), במשרעת המשתמעת ממשוואה (19).

כאשר J_φ היא צפיפות הזרם האזימוטלי. עבור מבנים נרחבים שקני המידה האופייניים שלהם דומים לגודלה של מערכת השמש או גדולים ממנו, אפשר לקבל בנקל גדלים של מומנט כוח בטווח

$$10^{16} \lesssim \tau MHD \lesssim 10^{18}\, Nm\,, \qquad (32)$$

הכולל בנוחות את הערך שהוסק במשוואה (19).

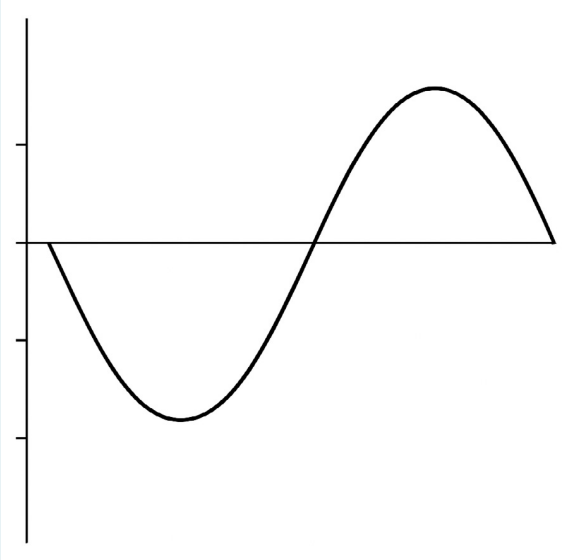
פרשנות והמכונה הבין-יקומית

לשם הבהירות, אנו מפנים במפורש להצגה הראשונית של המכונה הבין-יקומית שהציע המחבר: ראו [1] ואת דף המאמר המקושר (doi:10.23880/oaja-16000130).

עד לנקודה זו הניתוח היה שמרני במכוון. אנו: (i) גזרנו קו בסיס גאומטרי לדקלינציית השמש וכימתנו את התנהגות העצירה; (ii) זיהינו שארית גרבימטרית חצי-שנתית בנתוני GRACE הנעולה במופע לשארית הדקלינציה; (iii) הצגנו מודל מינימלי של שדה חיצוני אפקטיבי התואם תצפיות אלה; ו-(iv) הראינו שמבני פלזמה

Copyright © Yarel A

השראתיים ממוגנטים סלילית בקנה מידה גדול יוצרים מחלקה טבעית של מימושים התואמים את הסימטריה והגודל שהוסקו, תוך התאמה לאילוצים בלתי תלויים (איור 3).



איור 3: משמאל: שארית GRACE חצי-שנתית להמחשה, כמו באיור 2. מימין: המחשה סכמטית של צינור שטף מגנטוהידרודינמי סלילי הנושא זרם צירי J, שדה מגנטי B ומהירות זרימה v, בקואורדינטות גליליות (r, z). מבנים כאלה יכולים ליצור כוח אלקטרו-מניע השראתי ומאמץ מגנטי משמעותיים, ולספק מקור פיזיקלי מתקבל על הדעת למומנט הכוח החיצוני החלש שהוסק מתצפיות גאומטריות וגרבימטריות במערכת השמש.

הגרף המקורי נשמר ללא שינוי; הכיתוב שמתחתיו מתורגם.

כעת אנו קושרים את תיאור השדה האפקטיבי לפרשנות פיזיקלית קונקרטית. הרעיון המרכזי של המכונה הבין-יקומית אינו חוק כוח חדש, אלא סביבה מובנית שבה משובצת מערכת השמש: ארכיטקטורת פלזמה השראתית ארוכת ימים, מאורגנת צירית וממוגנטת סלילית, היכולה להחליף תנע זוויתי ואנרגיה עם מערכת כדור הארץ והשמש, ובה בעת להישאר חלשה דיה כדי לחמוק מאבחונים מסלוליים מקובלים.

במאמר הנוכחי אפשר לתאר את המכונה באופן תפעולי באמצעות הרכיבים המינימליים הבאים:

- **ציר מועדף יציב:** יחס המופע בין שאריות הדקלינציה לבין הרכיב הגרבימטרי החצי-שנתי מצביע על השפעה חיצונית המיוחסת לציר מתמיד. בתמונת המכונה, המבנה הסלילי בקנה מידה גדול מספק ציר זה (השוו לדרישת היישור הצירי בסעיף 4).
- **מגנוט סלילי והשראה:** תצורה ממוגנטת סלילית תומכת באופן טבעי בשדות חשמליים השראתיים דרך $B \times v$, ומעבירה מאמץ באמצעות מתיחות ולחץ מגנטיים. הדבר מספק ערוץ בעל הנמקה פיזיקלית למומנט כוח חלש, קוהרנטי וחצי-שנתי, ללא צורך באילוץ פנימי מהיר ומכוונן היטב במערכת כדור הארץ.
- **ערוץ מומנט כוח חלש אך קוהרנטי:** האילוץ האמפירי הוא משרעת מומנט כוח מסדר גודל $\tau_0 \sim 10^{17}\ \mathrm{N\,m}$ (משוואה 19), הפועלת מחזורית בסימטריה החצי-שנתית. בפרשנות המכונה, מומנט כוח זה הוא החותם המקרוסקופי של מאמצים מגנטיים/השראתיים בארכיטקטורה הסלילית הסובבת, המוטל על הגאומטריה המסלולית של כדור הארץ והשמש.
- **יציבות ארוכת טווח:** יציבות המופע הרב-שנתית תומכת במקור יציב בקני זמן של עשורים. לפיכך המכונה מטופלת כמבנה כמעט-נייח ביחס למערכת השמש, ולא כתופעה חולפת המונעת לסירוגין.

מנקודת המבט של השדה האפקטיבי שאומצה כאן, מקורו הקוסמולוגי המפורט של המבנה הסלילי הוא משני. מבחינה תצפיתית חשוב שהוא מתנהג כמערכת סלילית השראתית בקני מידה הרלוונטיים למערכת השמש, יוצר מומנט כוח בעל הסימטריה והגודל הנדרשים, ונשאר יציב לאורך משך המדידות. במובן זה, אפשר לראות במכונה הבין-יקומית מימוש קונקרטי אחד של השדה האפקטיבי המופשט אחרת Φ_{eff} [1]; עדיין אי אפשר לשלול מימושים אחרים באותה מחלקת סימטריה.

תחזיות תצפיתיות

מסגרת השדה החיצוני האפקטיבי שפותחה כאן מניבה כמה תחזיות הניתנות להפרכה, המבחינות בינה לבין מודלים שבהם ההליופיזיקה, הגאודזיה החללית ו-MHD קדם-כוכבית מטופלות כבלתי תלויות במידה רבה:

- **קוהרנטיות של אפנון חצי-שנתי:** אפנון חצי-שנתי מדויק אמור להופיע באופן קוהרנטי ב-(i) שאריות GRACE ו-GRACE-FO [4,5]; (ii) שאריות דקלינציית השמש ברמה של $\sim 0.01^\circ$; (iii) מדידות VLBI בדיוק גבוה של נוטציה ונקיפה; ו-(iv) האלמנטים המסלוליים של לוויינים מלאכותיים במסלולים מסונכרני שמש.
- **פליטת מיקרוגל מהעטרה:** ספקטרום הפליטה של העטרה אמור להציג רכיב התואם מקור מיקרוגל מתמשך הקשור לסלילים פעילים אלקטרומגנטית. ייתכן שניתן יהיה לגלותו כדפוס מסוים בתצפיות רדיו ותת-מילימטר, בעל אפנון זמן אופייני הקשור לגאומטריית המכונה [1].
- **סילונים סליליים קדם-כוכביים:** סילונים סליליים דו-קוטביים במערכות קדם-כוכביות אמורים להציג חתימות הולכה ופולרימטריה התואמות סלילים בקנה מידה גדול, לרבות סליליות מגנטית מסודרת והספק השראתי המספיק לחימום עטרות כוכביות בהתהוות לפני התבססותה של בעירה גרעינית יציבה [6].
- **יישור צירים:** בקני זמן ארוכים, ציר הסיבוב של השמש אמור לשמור על יישור מובהק סטטיסטית עם הכיוון המוסק של מומנט הכוח החיצוני, כפי שהוא משוחזר ממדידות גרבימטריות וגאומטריות משולבות [2,3].

Copyright © Yarel A

מסקנות

פיתחנו מסגרת מאוחדת גאומטרית-גרבימטרית-MHD, שבה הגאומטריה של השמש, הגרבימטריה של GRACE ודינמיקת MHD סלילית השראתית מתפרשות כשלושה היבטים תצפיתיים של תהליך בסיסי יחיד: מומנט כוח חיצוני חלש הפועל על מערכת כדור הארץ והשמש. מרכיבי המפתח של מסגרת זו הם:

- הוכחה גאומטרית לכך שעצירות הדקלינציה הנצפות בקרבת נקודות ההיפוך נובעות באופן טבעי מאפקטי היטל כאשר נטיית ציר כדור הארץ קבועה, ומספקות קו בסיס נקי שלעומתו אפשר לחפש מומנטי כוח חיצוניים עדינים.
- פרשנות של הרכיב החצי-שנתי המתמשך בגרבימטריית GRACE כחותם הגרבימטרי של מומנט כוח חיצוני חלש הפועל על מערכת כדור הארץ והשמש, במשרעת $\sim 10^{17}$ N m [4,5].
- מודל בעל הנמקה פיזיקלית שבו מבני פלזמה השראתיים ממוגנטים סלילית בקנה מידה גדול יוצרים שדה אפקטיבי בעל הצורה הנדרשת, ומפיקים באופן טבעי מומנט כוח חלש בקנה מידה גדול המיושר עם ציר מועדף [6,8].

יחד, מרכיבים אלה מגדירים מבוך אילוצים סגור: במסגרת הנתונים הגאומטריים והגרבימטריים המשולבים, המודלים המקובלים מגיעים למבוי סתום מדעי אלא אם מוכנס מבנה נוסף בקנה מידה גדול. המכונה הבין-יקומית מספקת מימוש עקבי מתמטית אחד של מבנה כזה [1]. אף שהיא ספקולטיבית כתרחיש קוסמולוגי מסוים, מסגרת השדה החיצוני האפקטיבי עצמה היא שמרנית וניתנת לבדיקה.

נספח א: בדיקת עקביות בסדר גודל עבור $\tau_0 \sim 10^{17}$ N m

מומנט כוח חצי-שנתי $\tau(t) = \tau_0 \sin(\omega_{6m} t + \varphi)$ הוא מחזורי לחלוטין, ולכן אינו יוצר סחיפה מצטברת בתנע הזוויתי. קנה המידה הרלוונטי הוא משרעת התנודה של התנע הזוויתי

$$\Delta L \sim \frac{\tau_0}{\omega_{6m}} \tag{33}$$

כאשר $\omega_{6m} = 4\pi/\text{yr}$. עבור $\tau_0 = 10^{17}$ N m מתקבל

$$\Delta L \approx 2.5 \times 10^{23}\, kgm^2 s^{-1}. \tag{34}$$

בהשוואה לתנע הזוויתי המסלולי של כדור הארץ, $L_{orb} \approx 2.66 \times 10^{40}$ kg m² s⁻¹, האפנון היחסי הוא

$$\frac{\Delta L}{L_{orb}} \sim 9 \times 10^{-18} \tag{35}$$

הנמוך בהרבה מסף הגילוי באלמנטים המסלוליים בקני זמן של עשורים. כחסם עליון שמרני, אם אותו מומנט כוח היה מצומד ישירות לתנע הזוויתי של סיבוב כדור הארץ, $L_{spin} \approx 5.85 \times 10^{33}$ kg m² s⁻¹, האפנון היחסי המתאים היה

$$\frac{\Delta L}{L_{spin}} \sim 4 \times 10^{-11} \tag{36}$$

שקול לשינויים באורך היממה ברמת מיקרו-שניות ($\Delta\text{LOD} \sim 4 \times 10^{-11} \times 86400$ s ≈ 4 μs), בהתאמה להיעדרה של חריגה מצטברת גדולה כלשהי [9].

תודות

המחבר מודה לקהילה האסטרופיזיקלית הרחבה על התשתית התצפיתית והתאורטית הענפה שעליה מסגרת זו מבקשת להתבסס.

מקורות

1. Yarel A (2024) Astronomy Paradigm Shift: Challenging the Big Bang through Interuniversal Phenomena Elucidating the Complex Governing Mechanisms of Solar Dynamics. Open Access J Astron 2: 000130.

2. Thompson MJ, Christensen-Dalsgaard J, Miesch MS, Toomre J (1996) Differential Rotation and Toroidal Magnetic Fields in the Solar Interior. Science 272: 1300-1305.

3. Beck JG (2000) A comparison of differential rotation measurements. Sol Phys 191: 47-70.

4. Wahr J, Swenson S, Zlotnicki V, Velicogna I (2004) Time-variable gravity from GRACE: First results. Geophys Res Lett 31: L11501.

5. Kornfeld RP, Arnold BW, Gross MA, Dahya NT, Klipstein WM, et al. (2019) GRACE-FO: The Gravity Recovery and Climate Experiment Follow-On Mission. J Spacecr Rockets 56: 931-951.

6. Livio M (1999) Astrophysical Jets: A phenomenological examination of acceleration and collimation. Phys Rep 311: 225-245.

7. Doeleman S, Weintroub J, Rogers AEE, Plambeck R, Freund R, et al. (2008) Event-horizon-scale structure in the supermassive black hole candidate at the Galactic Center. Nature 455: 78-80.

8. Blandford RD, Znajek RL (1977) Electromagnetic extraction of energy from Kerr black holes. MNRAS 179: 433-456.

9. Lindegren L, Hernandez J, Bombrun A, Klioner S, Bastian U, et al. (2018) Gaia Data Release 2: The astrometric solution. A&A 616: A2.

Copyright © Yarel A