

THE LEF MODEL · A SERIES OF TWELVE PAPERS

Lunar Elevation & Fission

8. המרכז דל המכתשים של

South Pole–Aitken

מקור חום מתחת לצד הרחוק, מול הפתחים של הצד הקרוב, מחק את המכתשים של מרכז
האגן

חלקים A–G · קטלוגי Robbins ו-Chang'e-6 · GRAIL · Wang · הברנר

זהר דוראן

חוקר עצמאי, רמלה, ישראל

ORCID <https://orcid.org/0009-0005-3194-9387>

תרגום מלא לעברית של המאמר האנגלי · 15 באוקטובר 2026

המכתשים הם רשומת הזמן של הירח. פני שטח צוברים מכתשים כל עוד הם חשופים לשמיים, ומאבדים אותם רק אם משהו מוחק אותם או מעבד אותם מחדש; ככל שפני שטח התקיימו זמן רב יותר, כך הם נושאים יותר מכתשים. (המדע הנוכחי מייחס את המכתשים לגופים שהגיעו מהחלל; בסדרה הזו הם נוצרו על ידי חומר שהושלך מכדור הארץ הצעיר, חזר ונחת על הקליפה של הירח, מאמר 6. כך או כך, פני שטח עתיקים יותר נושאים יותר מכתשים.) (SPA) South Pole–Aitken, בצד הרחוק — הצד שלעולם אינו נראה מכדור הארץ — הוא האגן הגדול, העמוק והעתיק ביותר על הירח, והוא אמור לשאת את אחת מרשומות המכתשים המלאות ביותר. בכללותו הוא דל במכתשים במידה מסוימת לעומת שאר הירח. אבל המרכז שלו דל בהרבה. כשסופרים מכתשים בטבעות מן האמצע של האגן החוצה, על קרקע שנוקתה ממישורי הלבנה ומ-34 הימות של הסדרה הזו (המישורים הכהים של הצד הקרוב והפתחים שמתחתם, מאמר 5), הספירה עולה בהתמדה מן המרכז אל השפה: האזור המרכזי מכיל רק כמחצית מהמכתשים שנמצאים ממש מחוץ לאגן. המקום שבו המכתשים מעטים ביותר — שאנו מכנים אותו *המינימום* — נמצא כ-270 ק"מ צפונה-צפון-מזרחה ממרכז האגן, על קו האורך של הנקודה הנגדית בדיוק ל-Serenitatis, אגן גדול בצד הקרוב (הנקודה הנגדית בדיוק למקום מסוים, דרך מרכז הירח, היא הנקודה האנטיפודית שלו, האנטיפוד). המכתשים של 20–40 ק"מ חסרים יותר מכול, ולא הקטנים ביותר; והמכתשים שנותרו רדודים יותר מאלה של החגורה שסביב השפה, בעוד השפות שלהם עומדות גבוה: ההבדל נמצא ברצפות, לא בשפות. זהו הדגם של מכתשים שהרצפות שלהם זחלו בחזרה כלפי מעלה — עברו הרפיה — מעל קרקע שהתרככה, ולא של מכתשים שנשחקו או התמלאו מלמעלה.

אנו מציעים שמרכז SPA רושם מקור חום מתחת לצד הרחוק — הברנר — בצד של הירח שמול הפתחים של הצד הקרוב. בסדרה הזו הירח הצעיר נבנה בעודו מחובר לכדור הארץ, מחומר של כדור הארץ שעלה דרך פתחים בצד הקרוב שלו; הברנר הוא החום שהצטבר מתחת לצד הרחוק, מול הפתחים האלה, וחימם מלמטה את הקרקע שמעליו. היו לו שתי יציאות, שנקראות על שם הפתחים בצד הקרוב שמולם הן ניצבות: Imbrium, הראשית, ו-Serenitatis, המשנית. הוא פעל בזמן שהגוף היה מחובר לכדור הארץ, ונרגע כשהפחיסות השתחררה, לפני השחרור; בשחרור הירח היה עגול והקליפה החיצונית שלו קשיחה (מאמר 2 B.78). החום בא מלמטה והגיע אל האזור כולו, אל חלקו העבה ואל חלקו הדק כאחד, והתך את שניהם. האזור, שנדחף וחומם מלמטה, התרומם לכיפה, והקרום שהתרכך החליק החוצה; חומר נדיף, וגם חומר פחות נדיף, גורש; ושכבות החומר החוזר נאפו ועברו דחיסה. חומר נושא ברזל מפנים כדור הארץ הגיע למקומות רבים בירח הצעיר, ובהם בסיס SPA; שם הוא חומם והתקרר במקומו, וכשחומרים אחרים עזבו, הברזל שנותר התרכז — המסה הצפופה שמתחת לדרום האזור. כשהחום נרגע, הכיפה התקררה, התכווצה וקרסה לאגן העמוק שנראה היום. הכיפה נמצאת מדרום לשתי היציאות: מיקום החיבור דמוי האגס לכדור הארץ וכוחות הסיבוב של כדור הארץ נשאו את החום מדרום לנקודה הנגדית, וההתעגלות של הגוף המוארך — המעבר שלו, בעודו מחובר, מצורה פחוסה לכדור (מאמר 7) — הגדילה את המרחק, מ-17–21° ל-24–29° של היום. שינוי בציר של כדור הארץ לאחר הניתוק עשוי גם הוא לגרום ל-SPA להיראות שלא בקו אחד עם הברנר; הצירים נשארים לעבודה עתידית.

המאמר פורש שבע-עשרה אנומליות של SPA, כל אחת בשישה שלבים, וחמישה מחקרים משלנו. מתוך שבע-עשרה האנומליות, המדע מסביר שש, מסביר תשע באופן חלקי, אחת בקושי ואחת כלל לא; המודל מתאים לשש-עשרה, ולאחת באופן חלקי, שהאיזוטופים יכריעו בה. כמה רשומות בלתי תלויות מסכימות זו עם זו. הדגימות של Chang'e-6, כ-210 ק"מ מן המינימום, מראות מעטפת שאיבדה את החומרים הנדיפים

שלה בחימום, דלה יותר בחמצן מאשר מתחת לצד הקרוב, עם תכים המשתרעים על פני כשני מיליארד שנה. המגנטיות מחוקה במרכז וחזקה בצד המאסף — באותו צד שבו נמצא סהר התוריום, אם כי לא באותו מקום (שיאי המגנטיות נמצאים כ-8° צפונית למרכז התוריום). הקרום שהחליק מן הכיפה מונח בשתי טבעות של קרום מעובה: טבעת חיצונית, עבה במזרח וחסרה במערב, וטבעת פנימית בשולי הכיפה.

התחזית המרכזית שלו היא שכמעט אין בירח חומר שמקורו מחוץ למערכת כדור הארץ-ירח: לכל היותר כמויות זעירות — גרגירים דקים של אבק חלל שנמשכו מאוחר יותר בכבידה של הירח אל שכבת פני השטח התחוחה, ואולי מטאוריט אחד או שניים שנחתו במשך ארבעה מיליארד שנה. שני נורטים עתיקים מ-SPA — חומר גבישי שהתמצק לאט מתך בעומק, שגילו נקבע ל-4.25 מיליארד שנה — נושאים גרגירים קטנים של מתכת ברזל-ניקל. המדע קורא אותם כשרידים של הגוף שפגע; המודל קורא אותם כברזל מפנים כדור הארץ. האיזוטופים של גרגירי המתכת האלה — היחסים בין אטומים מעט שונים של אותו יסוד, שמשתנים בין חומרים שנוצרו בחלקים שונים של מערכת השמש המוקדמת — יראו מאיפה הם באו. תמונת ראי פשוטה של האגנים בצד הקרוב אינה משחזרת את צורת האגן, והתוצאה השלילית הזו נשמרת. כל המיקומים ניתנים כפי שהירח פונה אל כדור הארץ היום.

מה המאמר מציג

הטענה. המרכז הדל במכתשים של South Pole–Aitken רושם מקור חום מתחת לצד הרחוק — הברנר — בצד של הירח שמול הפתחים של הצד הקרוב. הוא פעל בזמן שהגוף היה מחובר, ונרגע כשהפחיסות השתחררה, לפני השחרור; בשחרור הגוף היה עגול והקליפה שלו קשיחה (מאמר 2 B.7§). היו לו שתי יציאות: Imbrium, הראשית, ו-Serenitatis, המשנית. החום בא מלמטה והתיך את האזור, את חלקו העבה ואת חלקו הדק כאחד: האזור התרומם לכיפה והקרום שלו החליק החוצה; חומר נדיף וגם חומר פחות נדיף התאדה; שכבות החומר החוזר נאפו ועברו דחיסה; חומר נושא ברזל מפנים כדור הארץ הגיע אל בסיס האגן והתרכז שם כשחומרים אחרים עזבו. כשהחום נרגע, הכיפה התקררה וקרסה לאגן. הכיפה נמצאת מדרום לשתי היציאות, בכיוון שנקבע על ידי האגס והסיבוב והוגדל על ידי ההתעגלות (C.4).

המספרים. בתוך 10° ממרכז האגן, על קרקע שנוקתה ממישורי הלבנה, מ-34 הימות ומהילה של 200 ק"מ סביב כל אחד מהם: 126 מכתשים של 20 ק"מ ומעלה למיליון קמ"ר, 0.51 מה-248 שממש מחוץ לשפה — המרכז שומר כמחצית מהרשומה של הקרקע שלצדו. המינימום: 45.4° דרום, 197.9° מזרח, כ-270 ק"מ מהמרכז הנומינלי. מכתשים של 40–80 ק"מ ב-20° המרכזיות: רדודים ב-18% מאשר בחגורה שמחוץ לשפה (4–33%), על הקרקע הנקייה; השפות שלהם עומדות גבוה יותר מאשר בקבוצת ביקורת מותאמת (גובה השפה מנורמל לגודל המכתש: 1.35 לעומת 0.92) — רצפות רדודות מתחת לשפות גבוהות, הסימן של הרפיה ולא של שחיקה. מתחת ל-SPA: $\Delta IW = -1.93$ לעומת -0.80 מתחת לצד הקרוב. ΔIW מודד כמה חמצן היה זמין כשהחומר נוצר, ביחס לנקודת הייחוס שבה מתכת ברזל ותחמוצת ברזל מתקיימות יחד; כל יחידה נמוכה יותר פירושה פי עשרה פחות חמצן בקירוב, ולכן המעטפת שמתחת ל-SPA מחוזרת יותר, כפי שחימום חזק מלמטה היה משאיר אותה. סביבו: עיבוי של הקרום ב-3.8–5.7 ק"מ במרחק 50–55° מהמרכז, עבה במזרח וחסר במערב, וטבעת פנימית בשולי הכיפה — הקרום שהחליק מן הכיפה.

מה הוא דורש

מה הוא דורש. (1) קשר פיזי שנושא חום מהפתחים המכוסים אל האזור שמולם, לאורך ציר ישר, ומרוכז על ידי הסיבוב. (2) חום מספיק כדי להרפות מכתשים של 40–80 ק"מ בכחמישית בתוך תקופת החיבור.

התקופה הזו נמשכה לפחות כ- 10^7 שנה (מאמר 3) — החסם שמשמש להערכת הצמיגות — ובמודל כ-600 מיליון שנה בסך הכול, מתחילת הבליטה ועד השחרור לפני 3.873 מיליארד שנה. צמיגות היא ההתנגדות של חומר לזרימה איטית: ככל שהיא נמוכה יותר, רצפת מכתש זוחלת בחזרה כלפי מעלה מהר יותר. הדרישה היא צמיגות אפקטיבית של כ- $10^{21} \times 10^{22}$ פסקל-שנייה או פחות. הקרקע שעברה הרפיה אינה קרקע יבשה אלא חומר חוזר רווי מים, שהונח שכבה על גבי שכבה בזמן שהגוף היה מחובר; הצמיגות שלו נמוכה בהרבה מן החסם הזה, ולכן הדרישה מתקיימת בשוליים רחבים. (3) החומר שהגיע אל בסיס האגן נשא מתכת. באותו זמן לכדור הארץ לא הייתה ממש מעטפת ולא ממש ליבה — פנימו היה מעורב למדי — וחומר נושא ברזל עלה אל הירח וגם אל בסיס SPA; סיליקט מחומצן לבדו היה מחמצן את האגן במקום לחזור אותו. (4) מחסום הפוטנציאל האפקטיבי (האנרגיה לקילוגרם שחומר צריך לצבור כדי לעבור מכדור הארץ דרך החיבור אל הצד הרחוק, נגד הכבידה והסיבוב) ולחץ הבסיס המופחת, כפי שחושבו לגוף רציף בצורה של מאמר 3 (חלק D). (5) הירח לא הסתובב סביב עצמו מאז שנותק מכדור הארץ. מרכז אזור המגע (24.1° צפון, 335.2° מזרח, C.3) הוא קצה האגס, שעמד בכ- 22° – 24° צפון בזמן שהגוף היה מחובר (C.4); הוא נמצא במקום שבו האגס הציב אותו, ואין צורך בסיבוב של הירח כדי למקם אותו. (6) החום יצא מן הצד הרחוק מדרום לנקודה הנגדית, נישא על ידי הדחיפה האופקית בתוך האגס המסתובב, וההתעגלות של הגוף המוארך הגדילה את ההפרדה הזו (C.4); שינוי בציר של כדור הארץ לאחר הניתוק עשוי להוסיף עליה (עבודה עתידית). כל המיקומים כאן הם במערכת הייחוס של היום.

הדרישות של המודל, ומה שיבחן אותן, מרוכזים במאמר 11 (הדרישות).

הסביבה – נתונים ונקודות ייחוס

הסביבה. הגדלים שלהלן קובעים היכן נמצא האגן, כיצד נספרים המכתשים, ולאלו נקודות בצד הקרוב משווים את הצד הרחוק. מרכז SPA: 53° דרום, 191° מזרח; קוטר 2,400 ק"מ כמעגל של 39.57° ; אליפסה של $2,400 \times 2,050$ ק"מ (Garrick-Bethell & Zuber 2009). בסיס היחס: $1.00 =$ הטבעת 39.57° – 50° , ממש מחוץ לשפה; כל צפיפות מכתשים במאמר מחולקת בצפיפות של הטבעת הזו, כך שערך של 0.51 פירושו כמחצית ממנה. קטלוגים: Robbins (2019), מכתשים של 20 ק"מ ומעלה (6,973) ושל 40 ק"מ ומעלה (2,329); Wang et al (2021) לעומקים. מסכה — הקרקע שמוסרת לפני הספירה, משום שמישורי לבה צעירים איבדו את המכתשים העתיקים שלהם מסיבה שאינה עומדת כאן לבדיקה: מצולעי הימות של LROC, 34 הימות של מאמר 5 (הליבה של כיפת ההזנה שמתחת לכל אחד מהם) והילה של 200 ק"מ סביב כל אחד מהם. הפתחים: Imbrium 37° צפון, 341.5° מזרח; Serenitatis 25.4° צפון, 18.8° מזרח (הנקודות האנטיפודיות: 37° דרום, 161.5° מזרח, ו- 25.4° דרום, 198.8° מזרח). אתר הנחיתה של Chang'e-6: 41.625° דרום, 153.978° מערב (206.022° מזרח). מצב השחרור של הסדרה — יממה של כדור הארץ בת 5.77 שעות וקו קורוטציה ב-16,400 ק"מ (מאמר 2, B.1§) — נכנס ל-B9 ולחלק D. קו הקורוטציה הוא המרחק שבו גוף שמסתובב עם כדור הארץ כבר נע במהירות של מסלול חופשי — כלומר, גוף שמשלים סיבוב אחד בכל יממה של כדור הארץ; הירח החל להיפרד כשמרכז המסה שלו הגיע אליו, ושחרר כ-210 ק"מ מעבר לו, כשמעט יותר ממחציתו כבר עבר את הקו — נמשך החוצה בכוח, והמגע התנגד מעט.

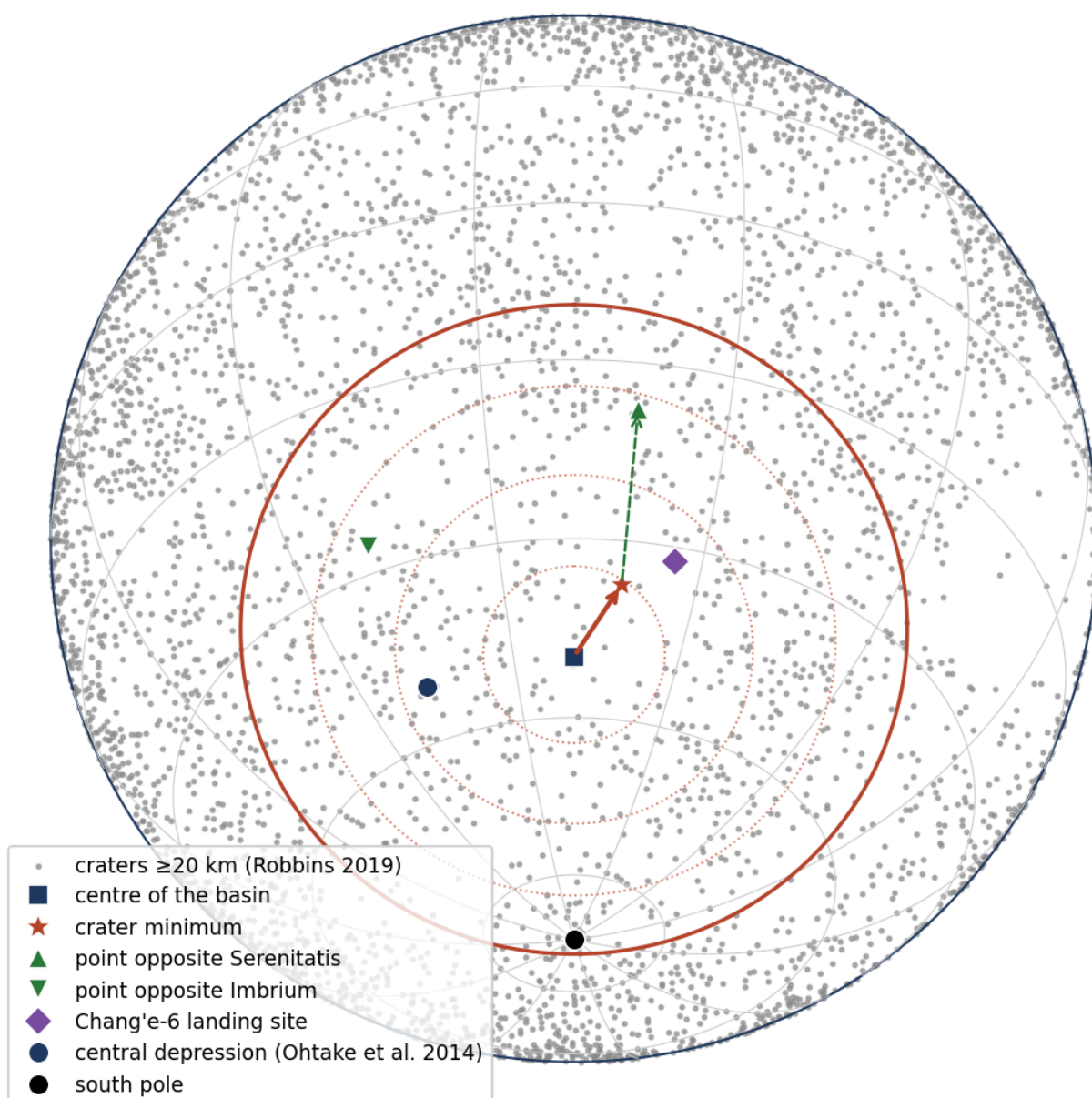
חלק A — מבוא: האגן והחידה שלו

החלק הזה מציג את האגן (A.1), קובע מה מוזר בו (A.2), מסכם כיצד המדע קורא אותו (A.3) והיכן הקריאה הזו אינה מספיקה (A.4), ואז פורש את התהליך שהמאמר מציע (A.5) ואת האופן שבו המדידות של החלקים הבאים מתאימות לו (A.6).

A.1 האגן

בצד הרחוק של הירח, מחוץ לטווח הראייה מכדור הארץ, נמצא האגן הגדול ביותר על פני השטח שלו. אגן הוא שקע רחב ועגול בקירוב, רחב בהרבה מעומקו, ומוקף קרקע מוגבהת. האגן הזה נמתח מהקוטב הדרומי כמעט עד המכתש Aitken, כ-17° דרומית לקו המשווה, ושמו נלקח משני הקצוות האלה: South Pole–Aitken, או SPA. אורכו כ-2,400 ק"מ ורוחבו 2,050 ק"מ — בערך המרחק מפריז למוסקבה, ויותר מחמישית מן ההיקף של הירח — ורצפתו נמצאת 6–8 ק"מ מתחת לרמות שמסביב, הקרקע העמוקה ביותר על הירח. הוא גם האגן הגדול העתיק ביותר שעדיין אפשר לזהות: דגימות שהובאו מתוכו מתארכות את היווצרותו לפני כ-4.25 מיליארד שנה, כשהירח היה בן כמה מאות מיליוני שנים בלבד.

אגן גדול כל כך מגיע עמוק. רצפתו חושפת חומר שבמקומות אחרים קבור, ושלוש חלליות הגיעו אליו מסיבה זו. Chang'e-4 הסינית נחתה על רצפתו ב-2019, במכתש Von Kármán, הנחיתה הראשונה בצד הרחוק; Chang'e-6 אספה ב-2024 את הדגימות הראשונות מן הצד הרחוק, מאגן Apollo בצפון-מזרח של SPA; ואזור הקוטב הדרומי שעל שפתו הוא היעד של המשימות המאוישות הקרובות. איור 1 ממקם את האגן ואת הנקודות שהמאמר משתמש בהן.



איור 1. South Pole–Aitken במבט מלמעלה (הטלה אורתוגרפית שמרכזה ב-40° דרום, 191° מזרח). נקודות אפורות: מכתשים של 20 ק"מ ומעלה (Robbins 2019). טבעת אדומה: שפת האגן כמעגל של 39.6° סביב מרכזו (53° דרום, 191° מזרח), עם טבעות ב-10°, 20° ו-30°. מסומנים: מרכז האגן; מינימום המכתשים; הנקודות הנגדיות בדיוק לאגנים Serenitatis ו-Imbrium בצד הקרוב; אתר הנחיתה של Chang'e-6; השקע הטופוגרפי המרכזי של Ohtake et al. (2014); והקוטב הדרומי. החץ האדום יוצא ממרכז האגן אל המינימום, והחץ הירוק המקווקו מן המינימום אל הנקודה הנגדית ל-Serenitatis. על מה להסתכל: הנקודות האפורות מתדלדלות לכיוון אמצע הטבעת האדומה, והכתם הדליל ביותר — המינימום — נמצא צפונה-צפון-מזרחה מן המרכז, לכיוון הנקודה הנגדית ל-Serenitatis.

A.2 החידה

המכתשים הם השעון של הירח. בלי אוויר, בלי מים ובלי מזג אוויר שישחקו אותם, המכתשים על הירח מצטברים כל עוד פני השטח קיימים; ספירתם ליחידת שטח נותנת את גיל פני השטח ביחס לשכניהם, ופני שטח גדלים במכתשים יותר מסביבתם צעירים יותר, או שעברו עיבוד מחדש. פני שטח עתיקים כמו אלה של South Pole–Aitken אמורים להיות צפופים במכתשים: הם חשופים לשמיים יותר מארבעה מיליארד שנה. המרכז שלהם אינו כזה. כשסופרים את המכתשים בטבעות מן האמצע של האגן החוצה, הספירה נמוכה ביותר במרכז ועולה לכיוון

השפה; המרכז מכיל רק כמחצית מהמכתשים שנמצאים ממש מחוץ לאגן, והנקודה שבה המכתשים מעטים ביותר — המינימום — נמצאת כ-270 ק"מ צפונה-צפון-מזרחה מן האמצע. המכתשים שנותרו שם רדודים יותר מאלה של החגורה שסביב השפה, אף שהשפות שלהם עומדות גבוה. זו החידה של המאמר: לאגן העתיק ביותר יש מרכז ששומר את הרשומה של פני שטח צעירים, ושומר אותה במכתשים רדודים.

ורשומת המכתשים אינה הדבר היחיד שמייחד את האגן. זהו האזור העמוק ביותר על הירח; הקרום שלו דק ומוקף קרום מעובה; רצפתו עשירה בברזל ובתוריום (יסוד רדיואקטיבי שמתרכז בשאריות האחרונות של תך), ובכל זאת יש בה מעט לבה נראית; מסה צפופה נמצאת עמוק מתחתיו; המעטפת שמתחתיו איבדה את היסודות הנדיפים שלה (אלה שמתאדים בקלות, כמו אשלגן) ודלה בחמצן; תך עלה שם במשך כשני מיליארד שנה; והמגנטיות הקרומית החזקה ביותר של הירח מתרכזת בשוליו. המאמר שואל אם תהליך אחד יצר את כולם.

A.3 מה המדע אומר עליו

South Pole–Aitken נחשב לצלקת של פגיעה ענקית לפני כ-4.25 מיליארד שנה. לפי ההשערה, הפגיעה הייתה אלכסונית — מצפון, ברוב הקריאות, או לכיוון דרום (Andrews-Hanna et al. 2025) — חפרה עמוק לתוך הקרום ואולי לתוך המעטפת העליונה, השליכה שמיכה עבה של חומר נפלט סביב האגן, והשאירה יריעת תך שנפרדה לשכבות כשהתקררה. חום הפגיעה, הברזל של הגוף הפוגע והוולקניזם שבא אחריה מופעלים כל אחד כדי להסביר תכונה אחת או יותר של האגן. לכל אנומליה יש כך הסבר משלה; למחסור המכתשים של המרכז אין הסבר מקובל.

A.4 היכן הקריאה המקובלת אינה מספיקה

הקריאה המקובלת מסבירה כל תכונה של האגן בנפרד, ואת כמה מהן היטב. אבל כשמצרפים אותן יחד ומעמידים אותן מול המדידות הזמינות כיום, נותרים שישה דברים שאינם מוסברים או שהסבר שלהם דחוק.

מחסור המכתשים. אגן שאופס בפגיעה אחת אמור להחזיק צפיפות אחידה ונמוכה יותר על פני כל הרצפה; הפגיעה מנקה את הרצפה ברגע אחד, ואז הרצפה כולה צוברת מכתשים באותו קצב. במקום זאת המחסור מרוכז במרכז, עולה בהתמדה לכיוון השפה, ומתחזק ככל שמסירים את מישורי הלבה ואת האגנים הצעירים יותר (B1a–B1d). הנקודה האחרונה חשובה: המחסור אינו נוצר מלבה שכיסתה את המרכז, שכן הסרת הלבה מחדדת אותו ולא מחלישה אותו. אין לו הסבר מקובל.

המיקום והגדלים שלו. המינימום נמצא כ-270 ק"מ צפונה-צפון-מזרחה ממרכז האגן, והמחסור בררני לפי גודל: המכתשים של 20–40 ק"מ חסרים יותר מכול, ואלה של 10–20 ק"מ כמעט אינם חסרים (B1e, B1h). לפני שטח צעירים יותר חסרים מכתשים מכל הגדלים; קבורה מסירה קודם את הקטנים, משום ששכבה שממלאת מכתש קטן רק מטשטשת מכתש גדול. אף אחד מהדגמים האלה אינו מתאים: כאן חסרים הגדלים הבינוניים, בעוד הקטנים כמעט כולם קיימים.

מעט לבה נראית. האגן העמוק ביותר על הירח, עם הקרום הדק ביותר, היה אמור להעדיף וולקניזם, שכן לתך שעולה מלמטה יש שם הדרך הקצרה ביותר אל פני השטח; ובכל זאת רק כ-4% ממנו הם ים, לעומת 30% מן הצד הקרוב (B8; גרסה קודמת נתנה 32%). זו חידה ידועה.

טבעת הקרום העבה. חומר נפלט מפגיעה אלכסונית היה נערם בכיוון התנועה, ונותן אסימטריה בין צפון לדרום. הטבעת סביב SPA אסימטרית בין מזרח למערב, וחוסר האחידות שלה עוקב אחר דגם אחר לגמרי (B4).

משך הזמן. התכים המתוארכים באתר משתרעים על פני כשני מיליארד שנה (B15). אחרי פגיעה אחת חייבים לבוא אירועים נפרדים ומאוחרים יותר כדי להסביר זאת. במודל, טווח הזמן הוא ההתקררות של פנים הירח ושל הליבה שלו, שנמשכה זמן רב; הסימן של South Pole–Aitken עצמו נוצר על ידי החום של כדור הארץ בזמן שהגוף היה מחובר.

המגנטיות. חומר נפלט מתכנס וברזל של הגוף הפוגע מסבירים שדות חזקים מול האגנים הגדולים של הצד הקרוב, אבל אינם נותנים סיבה לכך שהשדה יהיה חלש במינימום המכתשים, כפי שהוא אכן (B16).
על כל פער אפשרי ראשוני לענות בנפרד. השאלה היא אם יש להם סיבה אחת משותפת.

A.5 מנגנון LEF בקווים כלליים

אנו מציעים תהליך יחיד, שמסופר כאן לפי סדרו ובלי פרטיו.

הרקע. בסדרה הזו הירח הצעיר נבנה מחומר של כדור הארץ, שעלה דרך פתחים בצד הקרוב שלו — הימות (מאמר 5); ים הוא פתח מעל כיפת הזנה, שדרכו טיפס חומר מכדור הארץ אל הגוף הגדל. הגוף עמד על הקצה של המשך ארוך מחומרו של כדור הארץ עצמו, האגס, והסתובב עם כדור הארץ עד השחרור שלו (מאמרים 2–4).

הברנר. בצד הרחוק, מול הפתחים האלה, פעל מקור חום במשך זמן רב: הברנר. במילים פשוטות, הברנר הוא חום מפנים כדור הארץ שעבר דרך הגוף המחובר לאורך קו הפתחים והצטבר מתחת לצד הרחוק, ושם חימם את הקרקע מלמטה, כמו שלהבה מחממת את תחתית הסייר. היו לו שתי יציאות: Imbrium, הברנר הראשי, ו-Serenitatis, המשני; הוא פעל בזמן שהגוף היה מחובר ונרגע כשהפחיסות השתחררה, לפני השחרור. SPA עצמו לא היה פתח. באמצע האזור היה ים רגיל וגדול — פתח — שפלט חומר; אחר כך חומם יחד עם האזור כולו, התבשל ונמחק; הגילים של האתר משתרעים על פני הבנייה כולה (B15), וחלק גדול מן הלהבה שלו קבור (B9).

היכן הוא היה. בזמן ההתעגלות הוא היה סמוך לקו המשווה של אז, על המדרון של הקצה הרחוק של הגוף המוארך: החלק של הגוף שהיה הרחוק ביותר מעבר לרדיוס הקורוטציה, שם הסיבוב השליך חומר החוצה. (רדיוס הקורוטציה הוא המרחק ממרכז כדור הארץ שבו גוף שמסתובב עם כדור הארץ כבר נע במהירות של מסלול חופשי; מעבר לו, קרקע שעדיין נאלצת להסתובב עם כדור הארץ נמשכת החוצה, כמו שילד על קרוסלה מרגיש שנדחף החוצה יותר ככל שהוא יושב רחוק יותר מן האמצע.) בזמן הברנר, על הצורה הפחוסה, SPA היה כ-27° מן הקצה הרחוק הזה — הנקודה שמול מרכז אזור המגע (C.3); על הכדור של היום אותה הפרדה נקראת כ-39.5° (תימדה בעבודה עתידית; B5). (גרסה קודמת מדדה את ההפרדה הזאת מן הנקודה שמול נקודת הייחוס הישנה 23° צפון, 320° מזרח; ערכיה ניתנים פעם אחת ב-B5). ההבדל הוא המעבר מן הצורה הפחוסה לכדור, ולא תנועה של SPA על פני השטח.

אנטיפודי לפתחים. SPA אנטיפודי לפתחים של הצד הקרוב — המינימום שלו נמצא על קו האורך של הנקודה האנטיפודית ל-Serenitatis — ולא לנקודת חיבור יחידה. יחס אנטיפודי נשמר הן בסיבוב והן בהתעגלות: סיבוב הגוף כולו, או התעגלותו סביב מרכזו, נושאים נקודה ואת הנקודה הנגדית לה יחד, כך שזוג נקודות שעמדו זו מול זו דרך המרכז עדיין עומדות כך.

חום, כיפה, קריסה. החום בא מלמטה והגיע אל האזור כולו, אל חלקו העבה ואל חלקו הדק כאחד, והתיך את שניהם. האזור, שנדחף וחומם מלמטה, התרומם לכיפה, והקרום שלו, שהתרכך, החליק החוצה אל הצדדים; חומר נדיף, וגם חומר פחות נדיף, גורש; שכבות החומר החוזר נאפו ועברו דחיסה; חומר נושא ברזל מפנים כדור הארץ עלה אל בסיס האזור והתרכז שם כשחומרים אחרים עזבו; והמכתשים שעליו נמחקו או עברו הרפיה. כשהחום נרגע, הכיפה התקררה, התכווצה וקרסה לאגן העמוק שנראה היום — כמו סופלה, שהחום מרים אותו, ששוקע מתחת לשפת התבנית כשהוא יוצא מן התנור — והמכתשים שנוצרו לאחר מכן נחתו על קרקע דחוסה. זו הסיבה שהמרכז גם עמוק וגם דל במכתשים: אותו חום שהרים את הקרקע ואחר כך הפיל אותה מחק את הרשומה שעליה.

הכיוון הדרומי. הכיפה נמצאת מדרום לשתי היציאות: מיקום האגס וכוחות הסיבוב שלחו את החום מדרום לנקודה הנגדית, וההתעגלות של הגוף המוארך (מאמר 7) הגדילה את המרחק (C.3, C.4). ההתעגלות התרחשה

בזמן שהגוף היה מחובר; בשחרור הירח היה עגול והקליפה החיצונית שלו קשיחה (מאמר 2 § B.7).

מערכת הייחוס. הירח לא הסתובב סביב עצמו לאחר הניתוק: מרכז אזור המגע נמצא במקום שבו קצה האגס הציב אותו, בכ-22°–24° צפון. ייתכן שהציר של כדור הארץ השתנה: המיקומים במאמר הזה ניתנים במערכת הייחוס של היום, ומערכת הייחוס של אז נשארת לעבודה עתידית. בסדרה, מאמר 6 משאיר את מקור SPA פתוח, מאמר 7 משתמש ב-SPA כביקורת, ומאמר 11 מזהיר מפני שימוש ב-SPA לבדו כדי לבחון את האסימטריה בין צפון לדרום; המאמר הזה עוסק בו.

A.6 כיצד זה מתאים למה שנמצא

חלק B עובר על האנומליות אחת אחת: לכל אחת, הקריאה של LEF — הזרוע של התהליך שנוגעת בה — ומה שהיא מצפה לו, ואחר כך מה שנראה. בקווים כלליים, המדידות עונות על הציפיות של קריאת LEF באופן הבא.

התכונות קשורות במקום: מינימום המכתשים, הרצפה החריגה ואתר Chang'e-6 נמצאים במרכז האגן ובצפון; הקרום הדק ביותר, הקרקע הנמוכה ביותר והמסה הצפופה נמצאים בדרומו (כל המרכזים על מפה אחת: איור C.1). הן קשורות בכיוון: המחסור והגזרות הדלות ביותר שלו פונים אל הנקודה האנטיפודית ל-Serenitatis. הן קשורות בזמן: המעטפת שמתחת יובשה וחוזרה כפי שחום חזק מלמטה היה משאיר אותה, והתכים המתוארכים רושמים את ההתקררות הארוכה שבאה אחר כך. והקרום סביב האגן מעובה במקום שבו ההתעגלות של הירח הצעיר דחסה את פני השטח, ודק במקום שבו היא מתחה אותם. פגיעה אחת הייתה קובעת כל אחת מן התכונות האלה בדרך משלה; הברנר קובע אותן יחד, ולכן הן מסתדרות בקו אחד.

מתוך שבע-עשרה האנומליות, המדע מסביר שש במלואן, תשע באופן חלקי, אחת בקושי ואחת — רשומת המכתשים — כלל לא; המודל מתאים לשש-עשרה, ולאחת באופן חלקי, הממתינה לאיזוטופים שיכריעו בה (B18).

חלק B — האנומליות של SPA

חלק A הציג את טענת המאמר: מרכזו של South Pole–Aitken (SPA) רושם מקור חום מתחת לצד הרחוק — הברנר — עם שתי יציאות, Imbrium העיקרית ו-Serenitatis המשנית, שפעל בעוד הירח הצעיר מחובר לכדור הארץ ונרגע עם הרפיית הפחיסות, לפני השחרור. חלק B עובר מן הטענה אל הראיות. הוא שואל, תכונה אחר תכונה, מה נמדד בפועל ב-SPA, והאם המדידה הזאת מוסברת טוב יותר בקריאה המקובלת של האגן או בתהליך של המודל.

South Pole–Aitken שונה משאר הירח בדרכים רבות. חלק זה עובר עליהן אחת אחת, כל אחת בשישה שלבים: האנומליה — מה נמדד ובידי מי; החידה; מה המדע אומר; היכן המדע אינו מספיק, ובסופו פסק הדין שלו — מסביר, מסביר בחלקו, מסביר בקושי או אינו מסביר; מה המודל אומר — זרוע התהליך הנוגעת לעניין ומה היא מנבאת; וכיצד המדידות מתאימות למודל, ובסופו פסק הדין שלו — מתאים, מתאים בחלקו או פתוח. כל פסק דין עומד בתיבה משלו: תיבות המדע אינן משוות למודל, ותיבות המודל אינן משוות למדע. היכן שהמאמר מדד את האנומליה בעצמו, בא אחרי ששת השלבים מחקר בשבעה שלבים (מחקרים 1–5). האנומליה הראשונה היא רשומת המכתשים.

כיצד לקרוא את ששת השלבים. הסדר הוא הסדר שבו קורא זהיר היה רוצה לפגוש את הראיות. שלב 1 מציין רק את מה שנמדד, עם מקורו, לפני כל פרשנות. שלב 2 אומר במשפט או שניים מדוע המדידה מוזרה. שלב 3 מביא את ההסבר המקובל כפי שהספרות מביאה אותו, ושלב 4 מעמיד את ההסבר הזה מול המדידה, לעתים קרובות בטבלה קטנה של "מה הוא מנבא" מול "מה נמצא". רק אז שלב 5 מביא את הסיפור של המודל, ושלב 6 מעמיד את אותה מדידה מולו. שני פסקי הדין מוחזקים בנפרד בכוונה: כל אחד עונה על השאלה "האם ההסבר הזה, לבדו, מסביר את מה שנמדד?", כך שהקורא יכול לשפוט כל אחד מהם בלי שיצטרך לקבל את האחר. פסקי הדין של כל האנומליות מרוכזים בטבלה אחת ב-B18. היכן שהמאמר ערך את המדידה בעצמו ולא ציטט אותה, באים אחרי ששת השלבים מחקר הבנוי בשבעת השלבים של דוח מחקר (שאלה, רקע, השערה, מערך, נתונים, ניתוח, מסקנות), כדי שאפשר יהיה לבדוק את המדידה ולחזור עליה.

B1 רשומת המכתשים

בקצרה. מרכזו של South Pole–Aitken מחזיק מחצית מן המכתשים של הקרקע שממש מחוצה לו. המחסור פוחת בהדרגה לעבר השפה, נשמר גם על האליפסה, והוא החזק ביותר בצפון ובצפון-מזרח; המקום שבו המכתשים מעטים ביותר נמצא כ-270 ק"מ צפון-צפון-מזרחית למרכז, על קו האורך של הנקודה הנגדית ל-Serenitatis. הגדלים הבינוניים חסרים יותר מכול, הקטנים ביותר כמעט אינם חסרים, והמכתשים שנותרו רדודים מאלה של חגורת השפה בעוד שפותיהם עומדות גבוה.

המכתשים הם השעון של הירח. משטח אוסף אותם כל עוד הוא חשוף לשמים, ומאבד אותם רק אם משהו מוחק או מכסה אותו. אזור דל במכתשים הוא אפוא צעיר, או שמשהו פעל עליו. SPA הוא הגדול והעתיק מבין האגנים הגדולים, ולכן לפי השעון לבדו רצפיה הייתה צריכה להיות מן הצפופות ביותר על הירח. סעיף זה מודד עד כמה הרשומה שלו מלאה באמת, והיכן אינה מלאה.

STEP 1 האנומליה

כיצד זה נמדד. המכתשים נלקחים מן הקטלוג של Wang et al. (2019), 20 ק"מ ומעלה, ומזה של Wang et al. (2021). כל ההשוואות נעשות שווה מול שווה, על קרקע עתיקה. שלושה סוגים צעירים יותר של קרקע מוסרים משני הצדדים, מן הספירות ומן השטחים: מישורי הלבה של מפת 34 LROC;

הימות של מאמר 5, כל אחד עם ליבת כיפת ההזנה שמתחתיו; והילה של 200 ק"מ סביב כל ים, משום שים פעיל מפזר מכתשים סביבו ומוחק את הרשומה שלו עצמו (מאמר 5, A.2§). מה שנותר הוא הקרקע שהברנר פעל עליה. הרשומה מבוטאת כעוצמת הרשומה: המכתשים שנספרו מול המספר הצפוי בצפיפות של הטבעת שממש מחוץ לשפה (39.6°–50° מן המרכז, 53° דרום 191° מזרח).

מדוע הניקוי הזה חשוב. מישור לבה או רצפה ים הם משטח צעיר יותר: הם מחזיקים פחות מכתשים משום שהיו חשופים זמן קצר יותר, ולא בגלל משהו שקרה לרצפה העתיקה של SPA. אילו קרקע כזאת נשארה בספירה, האגן היה עלול להיראות דל במכתשים רק משום שיש בו לבה. ההילה מוסרת מסיבה מאותו סוג: במודל ים הוא פתח מעל כיפת הזנה, ובזמן שהיה פעיל הוא גם זרק חומר סביבו וגם עיבד מחדש את הקרקע הסמוכה לו. הסרת אותם סוגי קרקע מ-SPA וגם מכל משטח שהוא מושווה אליו שומרת על ההשוואה הוגנת: קרקע עתיקה מושווית רק לקרקע עתיקה.

כיצד לקרוא את עוצמת הרשומה. המרחקים ממרכז SPA ניתנים במעלות קשת, הנמדדות על פני הירח מן המרכז ב-53° דרום, 191° מזרח; בסולם זה שפת האגן, מעגל שקוטרו 2,400 ק"מ, נמצאת ב-39.6°. הטבעת 39.6°–50°, ממש מחוץ לשפה, היא הקרקע העתיקה הקרובה ביותר באותו אזור, וצפיפות המכתשים שלה נקבעת ל-1.00. עוצמת רשומה של 0.51 פירושה אפוא שמקום מחזיק 51 מכתשים על כל 100 שהיה מחזיק בצפיפות שממש מחוץ לאגן — כמחצית מן הרשומה שלו חסרה.

B1a המחסור מרוכז במרכז

מול שאר הירח, על אותו סוג קרקע, SPA כולו מחזיק 213.9 מכתשים של 20 ק"מ ומעלה למיליון קמ"ר לעומת 230.2 — פחות ב-7%. החוסר בא ממרכז האגן: הטבעת שבתוך 10° מחזיקה 0.51 מן הצפיפות שממש מחוץ לשפה, הטבעת הבאה 0.81 (B1c). חוסר של 7% על פני האגן כולו הוא צנוע; העיקר הוא שאינו מתפזר באופן אחיד. הטבעת המרכזית, בתוך כרבע מרדיוס האגן, נושאת את רובו.

B1b מול ביקורת באותם קווי רוחב

צפיפות המכתשים על הירח אינה זהה בכל קו רוחב, ולכן ביקורת הוגנת יותר היא הקרקע השוכנת באותם קווי רוחב כמו SPA. מול שאר הירח בין 90° דרום ל-13.4° דרום, על אותה קרקע מנוקה, SPA מחזיק 213.9 לעומת 239.5 — פחות ב-11%. החוסר על פני האגן כולו הוא מה שמחסור חזק המרוכז במרכזו יוצר.

B1c הפרופיל הרדיאלי

בספירה בטבעות מן המרכז החוצה, על הקרקע המנוקה, הצפיפות עולה מן המרכז אל השפה:

טבעת	אזור	≥ 20 ק"מ	יחס	≥ 40 ק"מ	יחס
10°–0	בפנים	125.7	0.51	47.7	0.57
20°–10	בפנים	200.4	0.81	64.5	0.77
30°–20	בפנים	226.7	0.92	73.5	0.88
39.6°–30	בפנים	225.6	0.91	73.7	0.88
50°–39.6	בחוץ	247.5	1.00	84.0	1.00

מכתשים למיליון קמ"ר. בסיס היחס: הטבעת 39.6°–50° שממש מחוץ לשפה. מישורי הלב, 34 הימות והילה של 200 ק"מ סביב כל אחד הוסרו מן הספירות ומן השטחים בשני הצדדים; 29, 87, 182, 309 ו-398 מכתשים של 20 ק"מ ומעלה בחמש הטבעות. הצבעים עוזרים לעין לקרוא את העלייה מן המרכז; הם אינם מבחן מובהקות.

כיצד לקרוא את הטבלה. כל שורה היא טבעת סביב המרכז, מן הפנימית ביותר (למעלה) עד הטבעת שממש מחוץ לשפה (למטה). העמודות נותנות את צפיפות המכתשים של 20 ק"מ ומעלה ושל 40 ק"מ ומעלה, ואחרי כל אחת את יחסה לטבעת החיצונית. הצבע עובר מצהוב חיוור, היכן שהמכתשים מעטים ביותר, לסלמון עמוק, היכן שהם צפופים ביותר; קראו כל עמודה כלפי מטה והצבע מעמיק לעבר השפה. שני ספי הגודל מספרים אותו סיפור: המרכז מחזיק כמחצית (0.51 ו-0.57), הטבעת הבאה כארבע חמישיות (0.81 ו-0.77), ומ-20° והלאה האגן מחזיק כתשע עשיריות מן הצפיפות החיצונית. המחסור אינו מדרגה בשפה; הוא שקע באמצע.

ככל שהשוואה נקייה יותר, המחסור המרכזי חזק יותר: 0.59 על כל הקרקע, 0.56 בלי מישורי הלבנה והימות, 0.51 כשמוסרת גם ההילה סביב כל ים. המשטחים הצעירים מטשטשים את המחסור; הם אינם גורמים לו. הרצף הזה עונה על ההתנגדות הראשונה שקורא צפוי להעלות — שהמרכז דל רק משום שלבה מכסה אותו. אילו הלבנה הייתה הסיבה, הסרתה הייתה מעלה את הספירה המרכזית לעבר החיצונית. קורה ההפך: כשכל משטח צעיר מוסר, הטבעת המרכזית נעשית דלה יותר, לא עשירה יותר.

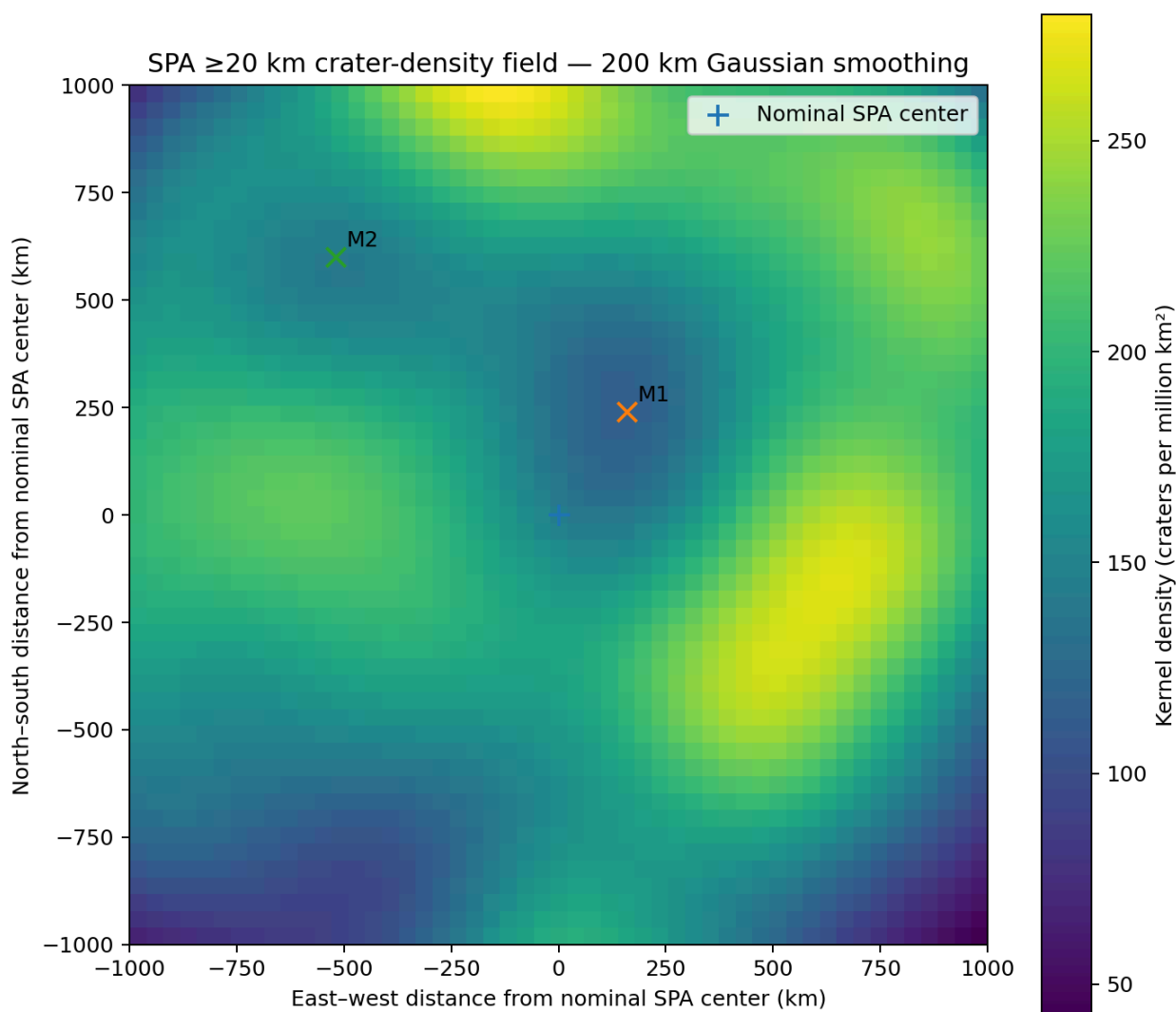
B1d המחסור נשמר על האליפסה

SPA אינו מעגל מושלם אלא אליפסה, ארוכה בכיוון אחד יותר מבאחר; טבעות המשורטטות כמעגלים עלולות לערבב קרקע של המרכז עם קרקע של הצלעות. לכן הספירה נעשתה שוב על האליפסה עצמה. כשהמרחק נמדד כמרחק מנורמל על אליפסת האגן (2050×2400 ק"מ) ולא על מעגל, על הקרקע המנוקה, הליבה נשארת דלה: 122 ו-132 מכתשים למיליון קמ"ר בתוך רבע מן חצאי הצירים, עבור שתי האוריינטציות של האליפסה שפורסמו ($\pm 18.8^\circ$), לעומת 230–235 במחציתה החיצונית ו-231–248 ממש מחוצה לה. המחסור אינו תוצר של התייחסות לאגן כאל עגול.

B1e היכן המכתשים מעטים ביותר

הטבעות מראות כיצד הרשומה משתנה עם המרחק, אך לא לאיזה כיוון נוטה המחסור. לשם כך דרושה מפה רציפה. מפת צפיפות רציפה — גרעין כדורי של 150–250 ק"מ, מנורמל בשטח הקרקע המנוקה שבתוך הגרעין — ממקמת את הצפיפות הנמוכה ביותר, המינימום, ב- 45.4° דרום, 197.9° מזרח עבור הגרעין המרכזי של 200 ק"מ, ובתוך 44.6° – 47.1° דרום, 196.1° – 198.9° מזרח עבור שני האחרים. גרעין הוא חלון נע: בכל נקודה של המפה נספרים המכתשים שבתוך מעגל ברדיוס הזה ומחולקים בשטח הקרקע העתיקה שבתוך המעגל, כך שחלון המכוסה בחלקו בקרקע ממוסכת אינו נספר כדל. שימוש בשלושה גדלי חלון שומר מפני מינימום המופיע רק עבור בחירה מסוימת אחת; כאן שלושתם ממקמים את המינימום בתוך מעלות ספורות מאותה נקודה.

המינימום נמצא כ-270 ק"מ צפון-צפון-מזרחית למרכז — כשהמרחק נמדד, כמו כל המרחקים בסעיף זה, ממרכז האגן ב- 53° דרום, 191° מזרח. שם עוצמת הרשומה היא 0.45 (111 מכתשים למיליון קמ"ר לעומת 247.5 מחוץ לשפה). המינימום שוכן על קו האורך של הנקודה הנגדית ל-Serenitatis (197.9° לעומת 198.8°), 606 ק"מ ממנה ו-860 ק"מ מן הנקודה הנגדית ל-Imbrium; אתר הנחיתה של Chang'e-6 נמצא 212 ק"מ ממנו. הנקודה הנגדית למקום — הנקודה האנטיפודית שלו (האנטיפוד) — היא הנקודה בצדו האחר של הירח שאליה מגיע קו ישר דרך מרכז הגוף; קו אורך (מרידיאן) הוא קו של אורך שווה הנמשך מקוטב לקוטב. לשכון על קו האורך של האנטיפוד של Serenitatis פירושו אפוא לשכון דרומה ממנו בדיוק, על אותו קו אורך, בתוך מעלה אחת.



איור B1.1. צפיפות המכתשים בתוך SPA וסביבו (גרעין של 200 ק"מ). המינימום נמצא צפון-מזרחית למרכז האגן.

כיצד לקרוא את איור B1.1. כל נקודה במפה צבועה לפי צפיפות המכתשים בחלון של 200 ק"מ סביבה. כתם הצפיפות הנמוכה רחב — הוא ממלא חלק גדול מן האזור המרכזי — אך אינו ממורכז באמצע האגן: הנקודה הנמוכה ביותר שלו מוסטת לצפון-מזרח. המדידה הבאה שואלת אם אותה נטייה מופיעה כשהמרכז פשוט נחתך לגזרות.

B1f שמונה גזרות

כשחוצים את 20° המרכזיות של האגן לשמונה גזרות, על הקרקע המנוקה, המחסור חזק ביותר בצפון ובצפון-מזרח:

גזרה	מכתשים	ל-10 ⁶ קמ"ר
צפון	12	112
צפון-מזרח	1	45
מזרח	20	182
דרום-מזרח	33	231

157	22	דרום
251	8	דרום-מערב
144	6	מערב
202	14	צפון-מערב

טבלה: צפיפות המכתשים בשמונה גזרות של 20° המרכזיות של SPA, על הקרקע המנוקה (B1f).

הגזרות הצפון-מזרחית והצפונית מחזיקות 45 ו-112 מכתשים למיליון קמ"ר, לעומת 144–251 באחרות. הספירות בכל גזרה קטנות (1–33 מכתשים); הכיוון מתאים למינימום. בטבלה הגזרות סובבות עם כיוון השעון מן הצפון, והצבע שוב עובר מחיזור (דל) לעמוק (עשיר): שני התאים החיוורים ביותר הם הצפון-מזרח והצפון. משום שגזרה מחזיקה לכל היותר כמה עשרות מכתשים, גזרה אחת לבדה יכולה להיות דלה במקרה; מה שנותן לתוצאה משקל הוא שהחלוקה הגסה הזאת והמפה החלקה של B1e, שנעשו בדרכים שונות, מצביעות לאותו כיוון.

B1g מכתשי המרכז רדודים מאלה של חגורת השפה

המחסור עוסק במכתשים החסרים. מדידה זו פונה אל המכתשים שנותרו, ושואלת אם גם הם נושאים סימן. הממד הוא היחס בין העומק לקוטר: כמה עמוק מכתש ביחס לרוחבו. למכתשים טריים בגודל נתון יש ערך אופייני; ערך נמוך יותר פירושו מכתש שהתמלא, התרכך או השתטח. בקטלוג של Wang et al. (2021), על הקרקע המנוקה, היחס בין העומק לקוטר נמוך יותר במרכז (0–10°) מאשר בטבעת שמחוץ לשפה, בכל גודל:

קוטר (ק"מ)	מרכז 0–10°	מכתשים	מחוץ לשפה	מכתשים
20–10	0.075	129	0.078	1,013
40–20	0.066	17	0.076	257
80–40	0.045	9	0.061	96

חציונים; מכתשים ששפתם נוגעת במישורי הלב, בים או בהילה שלו הוסרו.

כיצד לקרוא את הטבלה. כל שורה היא קבוצת גודל; שתי העמודות הצבועות נותנות את חציון היחס בין העומק לקוטר במרכז ומחוץ לשפה, ולצד כל אחת מספר המכתשים שנמדדו. חיזור יותר פירושו רדוד יותר. בכל שורה הערך המרכזי הוא החיזור מבין השניים, והפער גדל עם הגודל: כמעט אפסי במכתשים הקטנים (0.075 לעומת 0.078), ברור בקבוצה הבינונית (0.066 לעומת 0.076), והגדול ביותר במכתשים של 40–80 ק"מ (0.045 לעומת 0.061).

במבחן המחמיר יותר — מכתשים של 40–80 ק"מ ב-20° המרכזיות מול הטבעת שמחוץ לשפה, כשכל מכתש ששפתו נוגעת בקרקע הממוסכת מוסר — מכתשי המרכז **רדודים ב-18%** (bootstrap (דגימה חוזרת) 95%: 4–33%; 31 מכתשים בפנים, 96 בחוץ). רווח ה-bootstrap אומר עד כמה התוצאה הייתה יכולה להשתנות אילו נמדדה במקרה קבוצה אחרת של מכתשים: המכתשים נדגמים מחדש באקראי פעמים רבות, ההפרש מחושב מחדש בכל פעם, והטווח מכיל את 95 התוצאות האמצעיות מכל 100. הטווח כולו נמצא מעל אפס, כך שמכתשי המרכז רדודים יותר כמעט בכל דגימה חוזרת. Sori ו-Zuber (2012) דיווחו על מכתשים רדודים באופן חריג ב-SPA לאחר הוצאת המבנים שיש בהם ימות נראים. הניגוד נמדד מול הטבעת שממש מחוץ לשפה, שבה המכתשים עמוקים באופן יוצא דופן; מול ביקורת המותאמת בקו רוחב ובקוטר על פני הירח כולו, רצפות המרכז פחות עמוקות רק במעט וההפרש אינו מכריע (B1k). הניגוד בין המרכז לחגורת השפה הוא התוצאה האיתנה.

B1h המחסור לפי גודל

המחסור אינו זהה בכל גודל. בקטלוג Wang, סביב המרכז, על הקרקע המנוקה (למיליון קמ"ר):

טבעת	20–10 ק"מ	40–20 ק"מ	60–40 ק"מ	60≤ ק"מ
10°–0	581	78	30.3	26.0
20°–10	530	134	32.2	41.5
30°–20	553	176	39.9	39.9
39.6°–30	608	158	36.5	47.5
50°–39.6	638	165	42.3	49.1

טבלה: צפיפות המכתשים לפי טבעת ולפי קבוצת גודל, קטלוג Wang, על הקרקע המנוקה (B1h).

כיצד לקרוא את הטבלה. כאן כל עמודה צבועה בסולם משלה, חיוורת ביותר היכן שקבוצת הגודל הזאת נדירה ביותר. בשלוש הקבוצות הגדולות התא החיוור ביותר הוא הטבעת המרכזית והצבע מעמיק כלפי חוץ, כמו ב-B1c. בקבוצה הקטנה ביותר (20–10 ק"מ) העמודה כמעט שטוחה — 530 עד 638 — והטבעת המרכזית אינה החיוורת ביותר: המכתשים הקטנים כמעט אינם חסרים במרכז.

מול הטבעת שמחוץ לשפה, המרכז מחזיק 0.91 מן המכתשים של 20–10 ק"מ, 0.47 מאלה של 40–20 ק"מ, 0.72 מאלה של 60–40 ק"מ ו-0.53 מן הגדולים ביותר. החוסר חזק ביותר ב-40–20 ק"מ; הקבוצה הקטנה ביותר כמעט אינה מדולדלת. בהתאם, היחס בין מכתשים קטנים לגדולים יותר גבוה במרכז: 4.62 מכתשים של 20–10 ק"מ על כל מכתש של 80–20 ק"מ ב-10° המרכזיות (95%: 3.18–7.20), לעומת 2.13 (99–2.28) באותם קווי רוחב מחוץ ל-SPA; בטבעות שמעבר, 2.88, 2.39, 2.81 ו-2.79. העודף מוגבל למרכז. במילים פשוטות: על קרקע רגילה יש כשני מכתשים קטנים על כל מכתש גדול יותר; במרכז SPA יש יותר מארבעה, ושני הרווחים אינם חופפים. המרכז אינו פשוט צעיר יותר — למשטח צעיר יותר היו חסרים מכתשים קטנים וגדולים כאחד — הוא איבד חלק מסוים של הרשומה שלו, הגדלים הבינוניים, בעוד המכתשים הקטנים עומדים כמעט על מספרם שבחוץ.

B1iSPA והקוטב הדרומי

לרשומת המכתשים של SPA יש חשיבות גם מעבר לאגן, משום ש-SPA מכסה חלק גדול מאזור הקוטב הדרומי. הסרת SPA לבדו מכיפות הקוטב הדרומיות מעלה את צפיפותן: מ-250 ל-348 בתוך 10° (+39%), מ-215 ל-305 בתוך 15° (+42%), מ-207 ל-280 בתוך 20° (+35%); לאחר הסרתו, שני הקטבים שווים (מאמר 7, D.4). חלקי SPA שבתוך הכיפות מחזיקים כ-150 מכתשים למיליון קמ"ר לעומת כ-305 מחוצה להן. SPA אינו יוצר את העודף הדרומי; הוא מסתיר חלק ממנו. במילים אחרות: הקרקע הקוטבית הדרומית שמחוץ ל-SPA עשירה במכתשים כמו הצפון, והרצפה הדלה של SPA, השוכנת בתוך הכיפות הדרומיות, היא שמורידה את הממוצע שלהן.

STEP 2 החידה

מדוע מרכזו של האגן הגדול העתיק ביותר דל במכתשים, כשמשטח אוסף אותם כל עוד הוא קיים? מדוע המקום הדל ביותר נמצא צפון-צפון-מזרחית למרכז ולא בו? מדוע הגדלים הבינוניים חסרים יותר מכול והקטנים ביותר כמעט אינם חסרים? ומדוע המכתשים שנותרו רדודים, בעוד שפותיהם עומדות גבוה?

STEP 3 מה המדע אומר

SPA הוא הצלקת של פגיעה ענקית לפני כ-4.25 מיליארד שנה, ורצפה אופסה בידיה. כמה תהליכים מועלים להסבר רשומת מכתשים חלשה: הרפיה של הטופוגרפיה של המכתשים מעל פנים חם; הצפה בלבה מאוחרת, הקוברת מכתשים; קבורה תחת חומר הפליטה של אגנים מאוחרים; משטח צעיר יותר, האוסף פחות מכתשים; רוויה, שבה מכתשים חדשים מוחקים ישנים במצב של שיווי משקל (Fassett et al. 2012); ומכתשים משניים, המוסיפים מכתשים קטנים ליד גדולים. הרפיה היא השקיעה האיטית של תבליט כשהקרקע שמתחתיו חמה וחלשה: לאורך זמן רב רצפה המכתש עולה ושפתו שוקעת, כמו גומה שנלחצה בדבש סמיך ומתיישרת לאט. רוויה היא המצב שבו משטח צפוף כל כך שכל מכתש חדש הורס בערך כמה ישנים כמספר שהוא מוסיף, והספירה מפסיקה לעלות. חומר פליטה (ejecta) הוא החומר שנזרק ממכתש בזמן היווצרותו, ויכול לכסות כשמיכה את הקרקע שסביבו.

STEP 4 היכן המדע אינו מספיק

כל תהליך מקובל מנבא כיצד המכתשים החסרים אמורים להיות מסודרים. הטבלה מעמידה כל ניבוי לצד מה שנמדד ב-B1a–B1k.

הסבר	מה הוא מנבא	מה נמצא
איפוס אחד של האגן	צפיפות אחידה ונמוכה יותר על פני כל הרצפה	מחסור מרוכז במרכז, העולה לעבר השפה (B1c)
הצפה בלבה	מחסור היכן שהלבה נמצאת	המחסור מתחזק כשמישורי הבלבה והימות מוסרים (B1c)
קבורה תחת חומר פליטה	המכתשים הקטנים אובדים ראשונים	המכתשים הקטנים כמעט אינם אובדים; הגדלים הבינוניים אובדים יותר מכול (B1h)
משטח צעיר יותר	פחות מכתשים בכל גודל	0.91 ב-10–20 ק"מ לעומת 0.47 ב-20–40 ק"מ (B1h)
רוויה	אין מקום מועדף באגן	מינימום צפון-צפון-מזרחית למרכז, הגזרה הצפון-מזרחית הדלה ביותר (B1e, B1f)
הרפיה מעל פנים חם	רצפות רדודות ושפות נמוכות	רצפות רדודות עם שפות גבוהות (B1g, B1k)

טבלה: ההסברים המקובלים לרשומת מכתשים חלשה, מה כל אחד מנבא ומה נמצא (B1, שלב 4).

קראו כל שורה לרוחבה: כל תהליך מסביר תכונה אחת של הרשומה, אך כל אחד מנבא דפוס שהמדידה אינה מראה. איפוס יחיד אינו משאיר שקע באמצע; לבה אינה יכולה להיות הסיבה כשהסרתה מעמיקה את המחסור; שמיכת חומר פליטה קוברת מכתשים קטנים לפני גדולים; והרפיה מורידה שפות יחד עם רצפות. הקושי הוא שלרשומה יש את כל התכונות שלה בבת אחת.

הכרעת המדע: אינו מסביר

שום תהליך מקובל אינו נותן מחסור המרוכז במרכז, השוכן צפון-צפון-מזרחית לו, שבו הגדלים הבינוניים חסרים יותר מכול, עם מכתשים רדודים ששפותיהם עומדות גבוה.

STEP 5 מה המודל אומר

הברנר מחק והרפה את מכתשי המרכז. חומו בא מלמטה והתיך את האזור, את חלקיו העבים והדקים כאחד (B3, B4), ובתוך אזור הקרום הדק המחסור עוקב אחר כיוון הברנר: היציאה של Serenitatis, הקרובה יותר לנקודה שפנתה אל כדור הארץ, הזינה את החום בכיוון האנטיפוד שלה, צפון-צפון-מזרחית למרכז. המכתשים שנוצרו אחרי שהברנר נרגע נפלו על קרקע מבושלת ודחוסה, שבה פחות מאנרגיית הנחיתה הלך לסגירת חללים ויותר לכוחות שבונים את השפה, ולכן השפה עומדת גבוהה; בחגורת השפה שכבות החומר החוזר שמרו על החללים שלהן, ומכתשיה עמוקים. המכתשים הגדולים הם האוכלוסייה הוותיקה יותר, שנוצרה בידי מסות גדולות שהלחץ דחף החוצה בשלבים המוקדמים; הקטנים באים בעיקר מחומר שכדור הארץ זרק אחרי הניתוק, חלקים קטנים ובינוניים שהתפזרו באופן אחיד על כל הירח, ואולי גם מפתחים נוספים של הירח עצמו (D.3a); הם נפלו על גבי המשטח הישן. המודל מצפה למחסור בתוך אזור הקרום הדק השורד את הסרת המשטחים הצעירים, שהמקום הדל ביותר בו נוטה לעבר האנטיפוד של Serenitatis, למכתשים קטנים רבים יחסית במרכז ורק שם, ולשפות גבוהות על מכתשים רדודים.

קריאת הברנר במילים פשוטות. דמיינו גיליון שעווה המונח מעל פלטה חמה. היכן שהפלטה חמה ביותר הסימנים שנלחצו בשעווה מתרככים ונמוגים; בשוליים הקרים הם נשארים חדים. במודל רצפה SPA היא הגיליון הזה, והברנר הוא הפלטה שמתחתיו: היכן שחומו עלה מלמטה, המכתשים שכבר היו על פני השטח נמחקו או הורפו, והמחסור עמוק ביותר היכן שהחום היה חזק ביותר. החום עשה יותר ממחיקה. שכבות החומר החוזר הבונות את הצד הרחוק היו נקבוביות, מלאות חללים; כשחומו מלמטה הן התבשלו ונדחסו, כפי ששכבת שלג תחוח המתחממת מלמטה שוקעת לקרום צפוף יותר. כך נוצרים שני סוגי קרקע: רצפה מבושלת וצפופה במרכז וחגורה נקבובית, לא מבושלת, בשפה. המכתשים שנחתו אחרי שהברנר נרגע רושמים את ההבדל הזה — על הרצפה הצפופה פחות מאנרגיית הנחיתה הולך למעיכת נקבוביות ויותר לכוחות שבונים את השפה, ולכן השפות עומדות גבוהה; בחגורה הנקבובית המכתשים עמוקים. לבסוף, הכיוון: החום הוזן דרך היציאה של Serenitatis לעבר האנטיפוד שלה, ולכן המקום הדל ביותר אינו במרכז אלא לעבר אותו אנטיפוד. דפוס הגדלים נובע מסדר ההגעה: הגדלים הבינוניים והגדולים שייכים לאוכלוסייה הוותיקה יותר ונמחקו עם המשטח הישן, בעוד רוב המכתשים הקטנים הגיעו מאוחר יותר, מן החומר שכדור הארץ זרק אחרי הניתוק, על גבי המשטח שהברנר כבר עיבד.

STEP 6 כיצד זה מתאים למודל

המחסור מרוכז במרכז, 0.51 מן הסביבה, ומתחזק ככל שמישורי הल्בה, הימות וההילות שלהם מוסרים. המינימום שוכן על קו האורך של הנקודה הנגדית ל-Serenitatis (197.9° לעומת 198.8°). היחס בין מכתשים קטנים לגדולים יותר הוא 4.62 במרכז לעומת 2.13 במקומות אחרים, ורק במרכז. מכתשי המרכז רדודים מאלה של חגורת השפה, ושפותיהם עומדות גבוהה. כל אחד מארבעת הניבויים של שלב 5 מתקיים במדידה נפרדת: מקום המחסור (B1c, B1d), כיוונו (B1e, B1f), גדליו (B1h) וצורת מה שנותר (B1g, B1k).

הכרעת המודל: מתאים

המחסור שוכן בתוך אזור הקרום הדק, לעבר האנטיפוד של Serenitatis, עם דפוס הגדלים והשפות הגבוהות שהמודל מצפה להם.

B1j התצפית

המדידות של B1a–B1i מרוכזות כאן בהיגד אחד, בצורה שבה הן משמשות בהמשך המאמר.

תוצאה

כשהמדידה נעשית שווה מול שווה, על קרקע מנוקה ממישורי הלבה, מ-34 הימות ומהילה של 200 ק"מ סביב כל אחד, SPA כולו מחזיק 7% פחות מכתשים משאר הירח, והמחסור מרוכז במרכז: אזור רחב עם 0.51 מן הצפיפות שמחוץ לשפה, השורד על האליפסה, חזק ביותר בצפון ובצפון-מזרח, שהמינימום שלו נמצא כ-270 ק"מ צפון-צפון-מזרחית למרכז ב-45.4° דרום, 197.9° מזרח, על קו האורך של הנקודה הנגדית ל-Serenitatis; מכתשיו של 40–80 ק"מ רדודים ב-18% מאלה של חגורת השפה. הוא אינו השקע הטופוגרפי המרכזי (B2).

B1k מה רשומת המכתשים יכולה ואינה יכולה להראות

המדידות שלמעלה מתארות את המכתשים שעדיין אפשר לזהות. נשקלו כמה קריאות שלהן; כל אחת מוצגת כאן עם המבחן שיכריע בה. בסעיף זה מרוכזים גבולות הראיות של המכתשים, כדי שהקורא יראה אילו חלקים של B1 מוצקים ואילו ממתנים למדידה נוספת.

הקטלוג רואה רק את מה ששרד. מכתש שנמס או השתטח מעבר להכרה אינו בקטלוג; היעדרו הוא מחסור הצפיפות עצמו. המכתשים הנמדדים בתוך SPA הם אפוא תערובת של שתי אוכלוסיות: מכתשים ותיקים יותר ששרדו את תקופת החימום במצב בלוי ושטוח, ומכתשים צעירים יותר שנוצרו אחריה. מבחן: להפריד את המכתשים לפי גיל יחסי ולחפש שתי אוכלוסיות בתוך SPA.

מכתשים חדשים על קרקע דחושה. בקרקע נקבובית חלק מאנרגיית הנחיתה הולך לדחיסת הנקבוביות, והמכתשים נוצרים עם שפות נמוכות יותר; בקרקע צפופה, דלת נקבוביות, האנרגיה הולכת לחפירה, והשפות עומדות גבוה יותר (ניסויי היווצרות מכתשים ומודלים של מטרות נקבוביות: Housen et al. 1999; Housen & Holsapple 2003). טביעת רגל נותנת את התמונה: באבקה תחוחה הרגל שוקעת ודוחפת מעט כלפי מעלה סביבה; בחול לח ומוצק היא מעלה שוליים מוגבהים. כשהמדידה נעשית על הטופוגרפיה של LOLA (LDLM_256, כ-118 מ' לפיקסל; 1,058 מכתשים של 20–80 ק"מ), שפות המכתשים שבתוך 20° מן המרכז עומדות גבוה יותר מעל סביבתן מאשר בביקורת המותאמת בקו רחב ובקוטר (מנורמל: 1.35 לעומת 0.92). "מנורמל" פירושו שגובה כל שפה מחולק במה שאופייני למכתש בקוטר הזה, כך שאפשר להשוות מכתשים גדולים וקטנים בסולם אחד; ערך מעל אחד הוא שפה גבוהה מהרגיל. התוצאה נשמרת עם כל רקע שנבדק (1.5–2, 3–2 ו-3–4 רדיוסי מכתש, ומישור אזורי רחב יותר), וסביבתם של מכתשי המרכז אינה שקועה ביחס למישור הזה: השפות הגבוהות הן תכונה של המכתשים, לא של רקע שקוע.

המדידות יחסיות. באותה מדידה רצפות מכתשי המרכז שוכנות פחות עמוק מתחת לסביבתן (מנורמל 0.90 לעומת 1.03 בביקורת, לא מכריע; -952 מ' לעומת -1,454 מ' בטבעת שמחוץ לשפה). כשהרצפה נמדדת בטבעת הנמנעת מפסגות מרכזיות (0.3–0.6 רדיוסי מכתש), רצפות המרכז פחות עמוקות במעט מאשר בביקורת המותאמת, עם רווח הכולל היעדר הבדל. השאלה אם הרצפות השתנו נשארת פתוחה.

צורת השפה. חום מלמטה יכול לשטח את רכס השפה ולהרחיב את בסיסה; נחיתות קטנות מאוחרות עושות אותו דבר לאורך זמן. הצורה לבדה אינה מפרידה אפוא בין חימום לגיל. ברזולוציה של הטופוגרפיה הגלובלית רכס של מכתש בן 20–30 ק"מ אינו מופרד; השוואה גששית אינה מראה השטחה של הרכס, ובסיס רחב אולי במעט, ושני הממצאים אינם מכריעים. מבחן הרכס ממתין לטופוגרפיה ברזולוציה גבוהה יותר.

שני סוגי קרקע. במרכז SPA הקרום השכבתי התבשל ונדחס (B2, B6): למכתשיו שפות גבוהות ורצפות שאינן עמוקות. בחגורת השפה שכבות החומר החוזר לא התבשלו ושמרו על החללים שלהן: מכתשיה עמוקים באופן יוצא דופן (עומק מנורמל 1.10–1.13 בטבעות שב-30–45°). הניגוד בין המרכז לחגורת השפה עשוי להיות אפוא ניגוד בין שני סוגי קרקע. מבחן: הנקבוביות של הקרום בתוך SPA וסביבו (B6).

גילים יחסיים. צפיפות המכתשים הקטנים על חומר הפליטה הקרוב לשפת כל מכתש נוסתה כמדד לגיל יחסי; שפות מכתשי המרכז עומדות גבוה יותר בכל שלוש הקבוצות. אבל החום שמחק מכתשים מחק גם מכתשים קטנים, ולכן בתוך SPA המדד הזה מושפע מן התהליך הנבדק עצמו; פיצול לפי גיל אמיתי — יחסי חיתוך הממופים מכתש אחר מכתש — עדיין לא נעשה. יחס חיתוך הוא הכלל הגאולוגי הפשוט שלפיו מכתש החותר באחר הוא הצעיר מבין השניים.

חומר חוזר במהירויות שונות. במכתשים של 20–80 ק"מ היחס בין העומק לקוטר נקבע במידה רבה בקריסת הדפנות, התלויה בכבידה ובחוזק הקרקע; לסוג הקרקע — דחוסה או נקבובית — השפעה על צורת המכתש רבה יותר ממהירות החומר החוזר.

מה שיש בידינו עכשיו: על קרקע עתיקה, מרכז SPA איבד כמחצית מרשומת המכתשים שלו; האובדן מעמיק ככל שהמשטחים הצעירים מוסרים, נוטה לעבר האנטיפוד של Serenitatis, לוקח בעיקר את הגדלים הבינוניים, ומשאיר מכתשים רדודים עם שפות גבוהות. המחקר שלהלן מפרט כיצד זה נמדד.

1 THE RESEARCH • STUDY 1 המחקר • מחקר 1

STEP 1 הגדרת שאלת המחקר והבעיה

התופעה. מרכזו של South Pole–Aitken נראה דל במכתשים. **הפער בידע.** המחסור צוין, אך לא נמדד שווה מול שווה על קרקע עתיקה — כשמישורי הלבנה, הימות והקרקע שכל ים עיבד מחדש מוסרים בשני הצדדים — וגם לא נבדק היכן הוא שוכן, אילו גדלים הוא לוקח ומה הוא עושה למכתשים שנותרו. **שאלת המחקר:** על קרקע עתיקה, כיצד מתפלגת רשומת המכתשים של SPA — לפי מרחק מן המרכז, לפי כיוון ולפי גודל — ובמה נבדלים המכתשים שנותרו מאלה שסביב האגן?

STEP 2 סקירת ספרות (רקע מדעי)

SPA נקרא כפגיעה ענקית בת כ-4.25 מיליארד שנה (Garrick-Bethell & Zuber 2009; Andrews-Hanna et al. 2025). צפיפויות של מכתשים שעל גבי אגנים מתארכות אגנים ובודקות רוויה (Fassett et al. 2012); מכתשים ב-SPA נמצאו רדודים באופן חריג לאחר שהימות הנראים הוצאו (Sori & Zuber 2012). מטרות נקבוביות נותנות מכתשים עם שפות נמוכות (Housen et al. 1999; Housen & Holsapple 2003). **מה חדש כאן:** הקרקע העתיקה מוגדרת לפי הימות של הסדרה וההילה שכל אחד מהם עיבד; הרשומה ממופה ברציפות, לפי כיוון ולפי גודל; ושפות המכתשים שנותרו ורצפותיהם נמדדות מול ביקורת מותאמת.

STEP 3 ניסוח השערת המחקר

הברנר מחק והרפה את המכתשים היכן שחומו הגיע אל פני השטח, בתוך אזור הקרום הדק, לעבר האנטיפוד של Serenitatis. מכאן: מחסור המרוז במרכז שמתחזק, ולא נחלש, על קרקע נקייה יותר; מינימום צפון-צפון-מזרחית למרכז; הגדלים הבינוניים חסרים יותר מכול, הקטנים ביותר כמעט אינם חסרים; ומכתשים רדודים עם שפות גבוהות.

STEP 4 מערך המחקר (מתודולוגיה)

סוג המחקר: כמותי; צפיפויות לפי טבעת, גזרה וגודל, מפת צפיפות רציפה והשוואה מותאמת של צורת המכתשים. **המדגם:** 6,973 המכתשים של 20 ק"מ ומעלה של (Robbins 2019); המכתשים של 10 ק"מ ומעלה של (Wang et al. 2021). מדרום לקו המשווה; 1,058 מכתשים של 20–80 ק"מ לשפות ולרצפות. **הביקורת:** הטבעת 39.6°–50° שממש מחוץ לשפה; שאר הירח באותם קווי רוחב; לצורה — מכתשים מותאמים בקו רוחב ובקוטר. **הכלים:** מפת הימות של LROC, כיפות ההזנה של מאמר 5, הטופוגרפיה של LOLA, וקוד השוקל כל תא לפי שטחו האמיתי. שקילה לפי שטח אמיתי חשובה על כדור: תא ברשת קו רוחב-קו אורך מתכווץ לעבר הקוטב,

וליד הקוטב הדרומי, שבו שוכן SPA, ספירת תאים כשוויים הייתה נותנת משקל יתר לקרקע הקוטבית. הטבלה מפרטת כל כלל ואת הסיבה לו.

כלל	מדוע, במילים פשוטות
מישורי הלב, 34 הימות והילה של 200 ק"מ מוסרים, בשני הצדדים	כדי להשוות קרקע עתיקה לקרקע עתיקה; ים פעיל מעבד מחדש את הקרקע שסביבו
בסיס היחס: הטבעת שממש מחוץ לשפה	הקרקע העתיקה הקרובה ביותר באותו אזור
מכתשים של 20 ק"מ ומעלה לרשומה; 10 ק"מ ומעלה לגדלים	הקטלוג הגדול יותר שלם; הקטן יותר נותן את דפוס הגדלים
גרעינים של 150, 200 ו-250 ק"מ למינימום	המינימום אסור לו להיות תלוי בבחירת הגרעין

טבלה: כללי המדידה של מחקר 1 והסיבה לכל אחד.

STEP 5 איסוף הנתונים (ביצוע המחקר)

המסכה נקבעה לפני שהמכתשים נספרו. לסדר הזה יש חשיבות: לא ניתן היה לבחור את הקרקע שתוסר, אפילו שלא במודע, כך שתיתן את התשובה הצפויה. כל מכתש שיוך לפי מרכזו; מכתש ששפתו נוגעת בקרקע הממוסכת הוסר במבחני הצורה. הערכים הם הטבלאות של B1a–B1i.

STEP 6 ניתוח הנתונים ועיבודם

הפרופיל. 0.51 ב-10° המרכזיות, 0.81, 0.92 ו-0.91 בטבעות שמעבר; 0.57 למכתשים של 40 ק"מ ומעלה; 0.59 על כל הקרקע. האליפסה. 122 ו-132 בליבה לעומת 230–235 במחצית החיצונית. המינימום. 45.4° דרום, 197.9° מזרח, יציב בתוך 44.6–47.1° דרום, 196.1–198.9° מזרח על פני שלושת הגרעינים; עוצמת רשומה 0.45. הגזרות. צפון-מזרח 45 וצפון 112, לעומת 144–251 בשאר. הגדלים. 0.91, 0.47, 0.72 ו-0.53 מן הקבוצה הקטנה ביותר עד הגדולה ביותר; יחס קטנים לגדולים 4.62 (3.18–7.20) לעומת 2.13 (1.99–2.28). הצורה. מכתשים של 40–80 ק"מ רדודים ב-18% (4–33%); שפות 1.35 לעומת 0.92 בביקורת המותאמת.

STEP 7 הסקת מסקנות וכתובת הדוח

תוצאה. ההשערה נתמכת: המחסור מרוכז במרכז ומתחזק על קרקע נקייה יותר; המינימום שלו שוכן צפון-צפון-מזרחית למרכז, על קו האורך של הנקודה הנגדית ל-Serenitatis; הגדלים הבינוניים חסרים יותר מכול; והמכתשים שנותרו רדודים מאלה של חגורת השפה, עם שפות גבוהות. **מגבלות.** הספירות במרכז קטנות (29 מכתשים של 20 ק"מ ומעלה בטבעת המרכזית, 1–33 בכל גזרה); ניגוד הצורה נשען על 31 מכתשים ונמדד מול חגורת שפה שבה המכתשים עמוקים באופן יוצא דופן; הקטלוג רואה רק את מה ששרד; מכתשים משניים עשויים להוסיף למכתשים הקטנים. **כיווני המשך מחקר.** שתי אוכלוסיות לפי גיל יחסי, ממופות מכתש אחר מכתש; רכס השפות ברזולוציה גבוהה; ומבחן המכתשים הקטנים שעל גבי מכתשים מארחים גדולים, המוכן בחלק F.

B2 צורה ועומק

בקצרה. SPA עמוק יותר ממה שהקרום הדק שלו לבדו מסביר. העומק החסר גדול ביותר במרכז האגן (1.1–1.8 ק"מ) ופוחת לעבר השפה, והקרקע הנמוכה ביותר שוכנת מעל מסה צפופה בעומק.

B1 קרא את פני השטח של האגן דרך מכתשיו. B2 קורא את האגן כשלם: כמה הוא עמוק, והאם עומקו הוא מה שהקרום שלו היה נותן לו. התשובה תראה שמהו מעבר לקרום הדק הוריד את הרצפה, ושלעומק הנוסף הזה יש מרכז, כמו למחסור המכתשים.

STEP 1 האנומליה

SPA הוא האגן הגדול ביותר על הירח — אליפסה של $2\,050 \times 2\,400$ ק"מ (Garrick-Bethell & Zuber 2009) — והאזור הנמוך ביותר בו. עומקו תלוי בהגדרה:

הגדרה	עומק	מקור
מן הרצפה (0°–10° מן המרכז) עד הגובה הממוצע של השפה	כ-6 ק"מ	LOLA, מאמר זה
מן הרצפה עד רכסי השפה (האחוזון ה-95)	כ-9 ק"מ	LOLA, מאמר זה
מרצפה אופיינית עד השפה, SPA הצפוני	ק"מ 8.5	Ivanov et al. 2018
ממוצע, מן השפה עד הרצפה	כ-12 ק"מ	Zuber et al. 1994 (Clementine)

טבלה: עומק SPA לפי ארבע הגדרות (B2, שלב 1).

הטבלה מראה מדוע מספר יחיד לעומק SPA מטעה. שפתו של אגן גדול כל כך אינה רכס חד בגובה אחד: כשהמדידה נעשית עד גובהה הממוצע, הרצפה שוכנת כ-6 ק"מ מתחתיה; כשהיא נעשית עד הרכסים הגבוהים ביותר (5% העליונים של גובהי השפה), כ-9 ק"מ. הערכות ישנות יותר מנתונים גסים יותר מגיעות ל-12 ק"מ. כל הערכים מסכימים על העיקר — SPA הוא האזור העמוק ביותר על הירח — ומאמר זה משתמש בהגדרה הראשונה, הרגישה פחות לכמה פסגות גבוהות.

כיצד מדדנו. הבדיקה הראשונה הראתה שמכתשים גדולים ועמוקים שנוצרו אחרי האגן מזהמים את מדידת הגובה: הם מורידים את הגובה המקומי בלי קשר לאגן עצמו. לכן נמדד כאן רק פני השטח שבין המכתשים. מכתש של 20 ק"מ ומעלה הוסר יחד עם שוליים של רדיוס אחד עד שניים, וכך גם מישורי הלבה והפתחים. התוצאות זהות בכל רוחב שוליים. (הפתחים הם האגנים הצעירים שחפרו בורות משלהם ברצפה SPA; 36 הפתחים שבשימוש כאן הם הסימנים המקוריים של הסדרה, ששימשו במבחן הקרום של מאמר 5, והם רשימה שונה מ-34 הימות של הקטלוג של מאמר 5 שהוסרו ב-B1). הקרקע שנותרת אחרי ההסרה — המישורים שבין המכתשים — היא רצפה האגן עצמו, ולא הרצפות של מכתשים מאוחרים השקועים בה.

STEP 2 החידה

האגן עמוק יותר ממה שהקרום הדק שלו לבדו מסביר.

STEP 3 מה המדע אומר

העומק הוא עומק החפירה של הפגיעה. הקרום שנותר דק, וקרום דק עומד נמוך. זהו שיווי משקל איזוסטטי (איזוסטזיה): קרום קל צף על מעטפת צפופה, וככל שהוא דק יותר, הוא יושב נמוך יותר. גוש עץ הצף במים נותן את התמונה: לוח דק שט נמוך, גוש עבה עומד גבוה, משום שכל אחד שוקע עד שהוא דוחה את משקלו שלו. מתחת לאגן מחזיקה המעטפת עודף מסה של 2.18×10^{18} ק"ג לפחות, המגיע לעומקים של מאות קילומטרים (James et al. 2019); הוא מפורש כשארית ליבת הגוף הפוגע או כחומר צפוף מהתגבשות אוקיינוס המאגמה.

STEP 4 היכן המדע אינו מספיק

מעובי הקרום (GRAIL, ארבעה מודלים) חישבנו כמה נמוך האגן היה צריך לעמוד בגלל הקרום הדק שלו לבדו, והשווינו זאת לגובה הנצפה על המישורים שבין המכתשים. GRAIL היא משימת הכבידה שהשדה שלה, יחד עם הטופוגרפיה, נותן את עובי הקרום; ארבעה מודלי קרום שפורסמו נבדלים בהנחותיהם, ובכל הארבעה נעשה שימוש כדי שהתוצאה לא תישען על אחד מהם. החישוב הוא שיווי המשקל של הציפה משלב 3: היכן שהקרום דק יותר מאשר מחוץ לאגן, פני השטח חייבים לעמוד נמוך יותר, בשיעור העובי החסר כפול הפרש הצפיפות בין

המעטפת לקרום חלקי צפיפות המעטפת. עם הצפיפויות שבשימוש כאן (קרום 2,550, מעטפת 3,220 ק"ג/מ"ק) הגורם הזה הוא כחמישית: על כל קילומטר של קרום חסר, פני השטח שוקעים בכחמישית הקילומטר.

טבעת ממרכז SPA	נצפה (ק"מ)	הקרום לבדו (ק"מ)	שארית (ק"מ)
5°–0	–7.0	–5.9 עד –5.3	–1.8 עד –1.1
10°–5	–6.9	–5.9 עד –5.3	–1.6 עד –1.0
15°–10	–6.4	–5.9 עד –5.2	–1.2 עד –0.6
20°–15	–6.5	–6.0 עד –5.3	–1.2 עד –0.5
25°–20	–5.1	–4.8 עד –4.2	–0.9 עד –0.3
30°–25	–4.0	–3.8 עד –3.3	–0.7 עד –0.2
35°–30	–2.7	–2.2 עד –1.9	–0.8 עד –0.5
39.6°–35 (שפה)	–0.8	–0.5	–0.3 עד –0.2

שארית: מה שהקרום אינו מסביר. הגבהים ביחס לטבעת 39.6°–50. קרום 2,550 ק"ג/מ"ק, מעטפת 3,220 ק"ג/מ"ק. הטווח הוא זה של ארבעת מודלי GRAIL ושל שולי מכתשים של 1–2 רדיוסים.

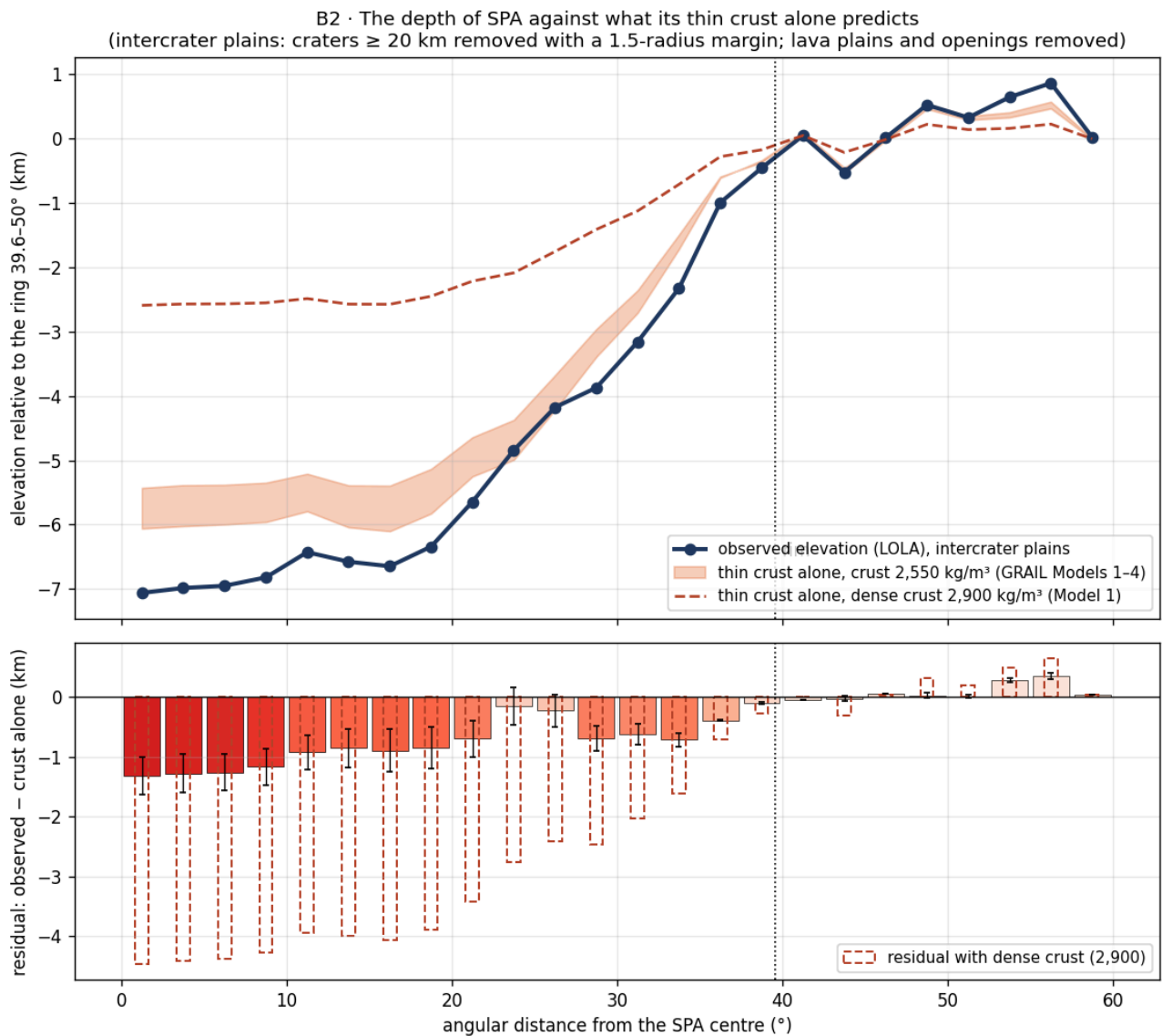
כיצד לקרוא את הטבלה. כל שורה היא טבעת של 5° סביב המרכז, מאמצע האגן (למעלה) עד השפה (למטה). עמודת המספרים הראשונה היא הגובה הנמדד, ביחס לקרקע שממש מחוץ לשפה; השנייה היא הגובה שהקרום הדק לבדו היה נותן; השלישית, השארית, היא ההפרש — העומק שהקרום אינו מסביר. בכל טבעת הרצפה הנצפית שוכנת מתחת לרצפה שהקרום מנבא, ולכן כל שארית שלילית. קראו את עמודת השארית כלפי מטה: היא הגדולה ביותר בשתי הטבעות המרכזיות (1.1°– עד 1.8°– ו-1.0°– עד 1.6°– ק"מ) ומתכווצת לעבר השפה, שם היא רק כמה מאות מטרים.

בצפיפות קרום רגילה, חסרים במרכז 1.1–1.8 ק"מ. רצפה SPA עשירה בברזל, וצפיפות הגרגרים שלה היא כ-3,000 ק"ג/מ"ק (Huang & Wieczorek 2012). עם קרום צפוף של 2,900 ק"ג/מ"ק (הערך שבאיור B2.1), הקרום הדק מסביר פחות, והפער במרכז גדל לכ-4.4 ק"מ. הסיבה היא שוב שיווי המשקל של הציפה: קרום צפוף יותר קרוב יותר בצפיפותו למעטפת שמתחתיו, ולכן הידלדלותו מורידה את פני השטח פחות, ויותר מן העומק הנצפה נשאר בלתי מוסבר.

הקרום הדק לבדו אינו מסביר את העומק. המסה הצפופה של James et al יכולה למלא את הפער, והקרקע הנמוכה ביותר שבין המכתשים (61° דרום, 199° מזרח, 5.5°– ק"מ) שוכנת כ-35 ק"מ ממרכזה המפורסם (62° דרום, 200° מזרח; גרסה קודמת נתנה כ-50 ק"מ). גוף צפוף בעומק מושך מטה את פני השטח שמעליו, בדיוק כפי שמשקולת התלויה מתחת ללוח צף גורמת לו לשוט נמוך יותר; כשהמסה הזאת נכללת, לקריאה המקובלת יש את מה שהיא צריכה.

הכרעת המדע: מסביר

המדע מסביר את העומק, בתנאי שהמסה הצפופה נכללת.



איור B2.1. למעלה: הגובה הנצפה (כחול) מול מה שהקרום הדק לבדו מנבא (רצועה כתומה) — קרום 2,550 ק"ג/מ"ק; מקווקו — קרום צפוף 2,900 ק"ג/מ"ק). למטה: השארית בכל טבעת; ככל שהעמודה אדומה יותר, השארית גדולה יותר. השארית הגדולה ביותר נמצאת בתוך 10° מן המרכז.

כיצד לקרוא את איור B2.1. הלוח העליון הוא הטבלה משורטטת כפרופיל מן המרכז (משמאל) עד השפה (מימין). הקו הכחול, הרצפה הנמדדת, עובר מתחת לרצועה הכתומה של ניבוי הקרום לבדו לאורך כל האגן, והרחק ביותר מתחתיה במרכז; הקו המקווקו של קרום צפוף שוכן גבוה עוד יותר ומשאיר פער גדול יותר. הלוח התחתון מראה רק את הפער, טבעת אחר טבעת, כשהצבע מעמיק ככל שהוא גדל: העמודות האדומות ביותר עומדות במרכז.

STEP 5 מה המודל אומר

חום מלמטה הרים את האזור לכיפה, והקרום החליק ממנה לצדדים. מקור החום נרגע עם הרפיית הפחיסות, לפני השחרור; אחרי השחרור, כשהגוף התרחק אל החלל, הקירור התחזק ושינה את המבנה: האזור המורם שקע לשקע, ושלושה שינויים מתמשכים השאירו את האגן נמוך.

במילים פשוטות, הברנר עשה לרצפה SPA מה שחום עושה לתבנית של בצק תופח המונחת מעל להבה: תחילה הוא ניפח את האזור כלפי מעלה, והקרום שהתרכך החליק במורד צלעות הנפיחות; אחר כך, כשהלהבה הונמכה

והאזור התקרר, הנפיחות שקעה בחזרה — ושקעה נמוך יותר ממה שהתחילה, משום שהחום שינה את החומר בזמן שפעל. שלושה שינויים כאלה נמנים.

קרום דק — מן ההחלקה ומהתכת בסיס הקרום.

חומר שאבד — החום הממושך אידה חומר נדיף וגם חומר פחות נדיף, שלא חזרו (B11; Tian et al. 2026). הברזל לא התאדה; הוא נשאר.

דחיסה — שכבות החומר החוזר, המלאות חללים, התבשלו מלמטה; אחר כך, בשלב הקירור שבא אחרי הניתוק, הן נדחסו והתכווצו. הדחיסה חזקה ביותר במרכז, היכן שהחום היה חזק ביותר, ונחלשת לעבר השפה.

בנוסף, חומר נושא ברזל מכדור הארץ הגיע אל בסיס האזור והתרכז שם כשחומרים אחרים עזבו (B10); המסה הצפופה הזו שבעומק מושכת את פני השטח שמעליה מטה.

השינוי הראשון הוא הקרום הדק שנמדד בידי GRAIL, ושיווי המשקל של הציפה משלב 4 כבר מסביר את העומק שהוא נותן. השארית של שלב 4 היא העומק שנותר, ובמודל היא פועלם של החומר שאבד ושל הדחיסה. הברזל המרוכז הוא הקריאה של המודל למסה הצפופה שגם המדע זקוק לה.

המודל מנבא עומק שהקרום הדק לבדו אינו מסביר; שארית שהיא הגדולה ביותר במרכז ופוחתת לעבר השפה; וקרקע נמוכה מעל המסה הכבדה.

STEP 6 כיצד זה מתאים למודל

השארית גדולה במרכז ופוחתת לעבר השפה, מ-1.1–1.8 ק"מ בתוך 10° עד 0.2 ק"מ בשפה, כפי שדחיסה הנחלשת החוצה מן המרכז מנבאת.

היא זהה בכל רוחב שוליים; לכן היא שייכת לאגן, ולא למכתשים.

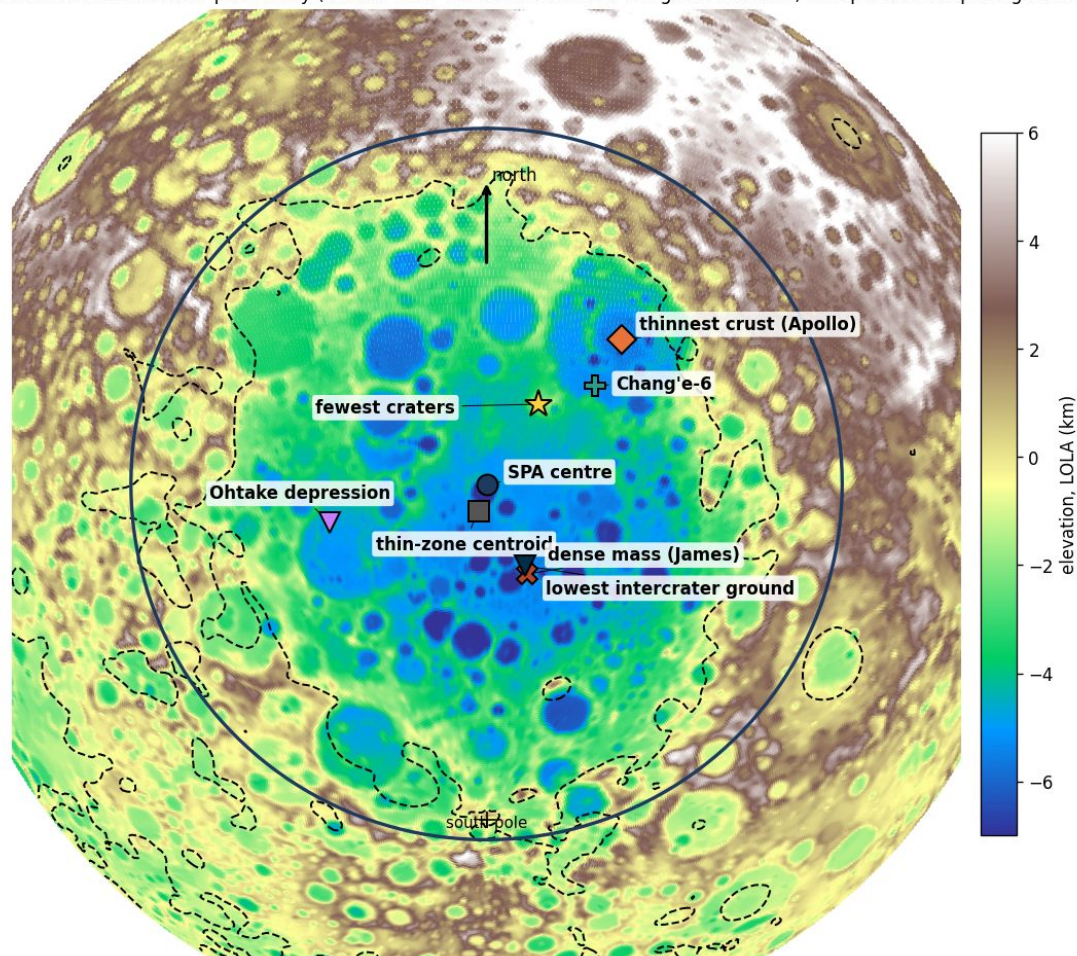
סדר הגודל מתאים: שארית של 1.1–1.8 ק"מ מתאימה לעמודה של 9–15 ק"מ שאיבדה 12% חללים; עם קרום צפוף, כ-37 ק"מ. החשבון פשוט: שכבה המאבדת 12% מנפחה כשהחללים נסגרים נעשית דקה ב-12%, ולכן עמודה של 9 עד 15 ק"מ שוקעת ב-1.1 עד 1.8 ק"מ, ופער של כ-4.4 ק"מ דורש עמודה של כ-37 ק"מ (4.4/0.12); גרסה קודמת נתנה כ-35 ק"מ).

הקרקע הנמוכה ביותר שוכנת מעל המסה הצפופה, כפי שריכוז ברזל בעומק היה נותן.

הכרעת המודל: מתאים

השארית הגדולה ביותר במרכז ויורדת לעבר השפה, שייכת לאגן ולא למכתשים, ובגודל שדחיסה נותנת; הקרקע הנמוכה ביותר שוכנת מעל המסה הצפופה.

The centres of South Pole-Aitken — north: fewest craters, thinnest crust; south: lowest ground over the dense mass
 Blue ring: SPA rim (39.6°). Dashed: crust thinner than 30 km (GRAIL Model 1). Colours: LOLA elevation (LDEM_4).
 Lowest ground measured on intercrater plains only (craters ≥ 20 km removed with a margin of 1-2 radii; lava plains and openings removed)



איור B2.2. המרכזים של SPA (גובה LOLA; טבעת כחולה: השפה, 39.6° ; מקווקו: קרום דק מ-30 ק"מ, מודל 1 GRAIL). בצפון-מזרח: המכתשים המעטים ביותר, Chang'e-6 והקרום הדק ביותר (Apollo). באמצע: מרכז האגן ומרכז אזור הקרום הדק. כ-300 ק"מ דרומה: המסה הצפופה, והקרע הנמוכה ביותר מעליה.

כיצד לקרוא את איור B2.2. המפה מציבה במבט אחד את ה"מרכזים" הרבים שמתברר שיש ל-SPA. עקבו אחריהם מצפון לדרום: תחילה הקבוצה של הצפון-מזרח, היכן שהמכתשים מעטים ביותר והיכן ש-Chang'e-6 נחתה; אחר כך המרכז הגאומטרי של האגן; אחר כך, בדרום, המסה הצפופה והקרע הנמוכה ביותר. האיור הוא המבט הראשון על דפוס שהמאמר חוזר אליו: לאגן אין מרכז אחד אלא שני מוקדים, אחד בצפון ואחד בדרום.

מה זה מראה. הקרום הדק אינו מספיק. אפילו בצפיפות קרום רגילה חסר עומק במרכז; עם קרום עשיר בברזל, הרבה יותר. שני ההסברים זקוקים למשהו מעבר לקרום הדק, ושניהם מספקים אותו. במודל שני דברים פועלים יחד: דחיסה כללית, החזקה ביותר במרכז ונחלשת לעבר השפה, ומסה כבדה בדרום המושכת את פני השטח שם עוד יותר מטה.

ל-SPA שני מוקדים: בצפון, מחיקת המכתשים (כיוון הברנר); בדרום, העומק והמסה (ברזל מרוכז). B1 ו-B2 מתחברים: היכן שהחום עבר, והיכן שהברזל התרכז. מכתשים מזהמים מדידות גובה; מכאן והלאה, הגבהים נמדדים על המישורים שבין המכתשים. B2 אינו מכריע בין ההסברים, אך הוא מראה שנדרש יותר מקרום דק.

נתונים וקוד.

נתונים	מקור
--------	------

גובה	LOLA LDEM_4 (4 פיקסלים למעלה, 7.6 ק"מ), PDS; SHA-256 c04632eb...af476
עובי הקרום	GRAIL, ארבעת המודלים של 2013, Wieczorek et al. רשת של 0.25°
מכתשים למסכה	Robbins 2019, ≥ 20 ק"מ, בלי אגנים הגדולים מ-300 ק"מ (2,546 מכתשים סביב SPA)
לבה ופתחים	LROC; 36 הפתחים (נדגמו מן המפה שלנו, הרדיוסים מקטלוגים)
קוד	B2_depth_19 — תיקייה b2.py, b2plains.py, b2fig.py

טבלה: הנתונים והקוד של B2.

פתוח. הרדיוסים של 36 הפתחים עדיין טעונים בדיקה. הירידה בשארית סביב 23°–26° והעלייה המחודשת ב-28°–34° ייבדקו כתכונה אמיתית (חגורת השפה) או כרעש. הכרעת המדע תלוי במסה של James et al.; B10; בודק את מיקומה ואת עומקה.

מה שיש בידינו עכשיו: רצפה SPA שוכנת במרכזה 1.1–1.8 ק"מ עמוק יותר ממה שהקרום הדק שלה נותן, העומק הנוסף נמוג לעבר השפה, והקרע הנמוכה ביותר עומדת מעל המסה הצפופה בדרום. יחד עם B1, האגן מראה מוקד צפוני שבו מכתשים נמחקו ומוקד דרומי שבו הרצפה שקעה.

2 THE RESEARCH • STUDY המחקר • מחקר

STEP 1 הגדרת שאלת המחקר והבעיה

התופעה. SPA הוא האזור הנמוך ביותר על הירח. **הפער בידע.** עדיין לא פורט כמה מעומקו מסביר הקרום הדק שלו בשיווי משקל איזוסטטי, טבעת אחר טבעת, כשהמדידה נעשית על הקרקע שבין המכתשים ולא על מכתשים שנוצרו אחר כך. **שאלת המחקר:** כמה עמוק SPA לעומת מה שהקרום הדק שלו לבדו מנבא, וכיצד משתנה השארית מן המרכז אל השפה?

STEP 2 סקירת ספרות (רקע מדעי)

העומק נקרא כעומק החפירה של הפגיעה, כשהקרום הדק צף נמוך ומסה צפופה שוכנת מתחת לאגן (James et al. 2019); הרצפה עשירה בברזל, עם צפיפות גאגרים קרובה ל-3,000 ק"ג/מ"ק (Huang & Wieczorek 2012). **מה חדש כאן:** הגובה נקרא רק על המישורים שבין מכתשים של 20 ק"מ ומעלה, כשמישורי הלבה והימות מוסרים, מול הקרום של כל ארבעת מודלי GRAIL, טבעת אחר טבעת.

STEP 3 ניסוח השערת המחקר

הדחיסה של השכבות המבושלות הייתה חזקה ביותר במרכז, היכן שהחום היה חזק ביותר; לכן האגן עמוק יותר ממה שהקרום הדק שלו מסביר, והשארית גדולה ביותר במרכז ויורדת לעבר השפה.

STEP 4 מערך המחקר (מתודולוגיה)

סוג המחקר: כמותי; גובה נצפה מול הניבוי האיזוסטטי, לפי טבעת. **המדגם:** הגובה של LOLA (LDEM_4) על המישורים שבין המכתשים, בטבעות של 5° סביב המרכז. **הכלים:** ארבעת מודלי הקרום של GRAIL (Wieczorek et al. 2013), קרום 2,550 ומעטפת 3,220 ק"ג/מ"ק, עם קרום צפוף של 2,900 כבדיקה; (Robbins 2019) למסכת המכתשים, עם שוליים של רדיוס אחד עד שניים.

STEP 5 איסוף הנתונים (ביצוע המחקר)

מכתשים של 20 ק"מ ומעלה הוסרו עם שוליהם, ומישורי הלבה והימות יחד איתם; הגבהים והקרום נקראו על מה שנותר, ביחס לטבעת 39.6–50°. הערכים הם הטבלה של שלב 4 ואיור B2.1.

STEP 6 ניתוח הנתונים ועיבודם

השארית היא 1.1– עד 1.8 ק"מ בתוך 5°, 1.0– עד 1.6 ב-5–10°, ויורדת ל-0.2– עד 0.3– בשפה; עם קרום צפוף היא גדלה לכ-4.4 ק"מ במרכז. היא זהה בכל רוחב שוליים, ולכן שייכת לאגן ולא למכתשים. הקרקע הנמוכה ביותר שבין המכתשים (61° דרום, 199° מזרח, 5.5– ק"מ) שוכנת כ-35 ק"מ מן המרכז המפורסם של המסה הצפופה של James et al. (2019).

STEP 7 הסקת מסקנות וכתובת הדוח

תוצאה. ההשערה נתמכת: האגן עמוק יותר ממה שהקרום הדק שלו מסביר, והשארית גדולה ביותר במרכז ויורדת לעבר השפה, כפי שדחיסה הנחלשת החוצה הייתה יוצרת; שארית של 1.1–1.8 ק"מ מתאימה לעמודה של 9–15 ק"מ שאיבדה 12% מחלליה. **מגבלות.** מודל הגובה מפריד 7.6 ק"מ; השארית תלויה בצפיפות הקרום המונחת; המסה הצפופה שמתחת לאגן יכולה גם היא למלא את הפער. **כיווני המשך מחקר.** הנקבוביות בעומק בתוך האגן וסביבו (B6); הירידה של השארית ב-23–26° ועלייתה ב-28–34°.

B3 קרום דק

B1 ו-B2 קראו את פני השטח של SPA: את המכתשים שלו ואת עומקו. B3 ו-B4 יורדים שכבה אחת למטה, אל הקרום עצמו — הקליפה החיצונית הקלה של הירח, המונחת על המעטפת הצפופה ממנה. B3 שואל מה עובי הקליפה הזאת בתוך האגן והיכן היא הדקה ביותר; B4 שואל מה עלה בגורל הקרום החסר שם.

בקצרה. הקרום בתוך SPA הוא הדק ביותר על הירח. כאשר מסירים את הפתחים — אגנים צעירים שחפרו בו חורים משלהם — מרכזו של הקרום הדק של SPA עצמו נמצא כ-150–190 ק"מ דרומית למרכז האגן, והנקודה הדקה ביותר שלו נמצאת בדרום, סמוך לקרקע הנמוכה ביותר ולמסה הצפופה.

STEP 1 האנומליה

כיצד יודעים את עובי הקרום. שום גשושית לא קדחה בקרום הירח; עוביו נקרא מן הכבידה. משימת GRAIL (שתי חלליות שטסו במבנה סביב הירח) מדדה את שדה הכבידה של הירח בפירוט רב. הקרום קל מן המעטפת שמתחתיו, ולכן במקום שבו הקרום דק והמעטפת הצפופה מתקרבת אל פני השטח, משיכת הכבידה חזקה מעט יותר. הכבידה שהטופוגרפיה הנראית (שנמדדה במד הגובה הלייזרי LOLA) אינה מסבירה — אנומליית Bouguer, הכבידה לאחר שהוסרה ממנה משיכת תבליט פני השטח — נקראת אפוא כתבליט של בסיס הקרום: אנומליית Bouguer חזקה מסמנת בסיס רדוד, וחלשה מסמנת בסיס עמוק. המרת כבידה לעובי דורשת הנחות — צפיפויות הקרום והמעטפת, והעובי במקום ייחוס אחד — ו-Wieczorek et al. (2013) פרסמו ארבעה מודלים של הקרום הנבדלים בבחירות אלה. תוצאה המתקיימת בכל הארבעה אינה תלויה בהן; לכן כל מדידה ב-B3 וב-B4 ניתנת בכל ארבעת המודלים, או בשניים התוחמים אותם (מודל 1 ומודל 4).

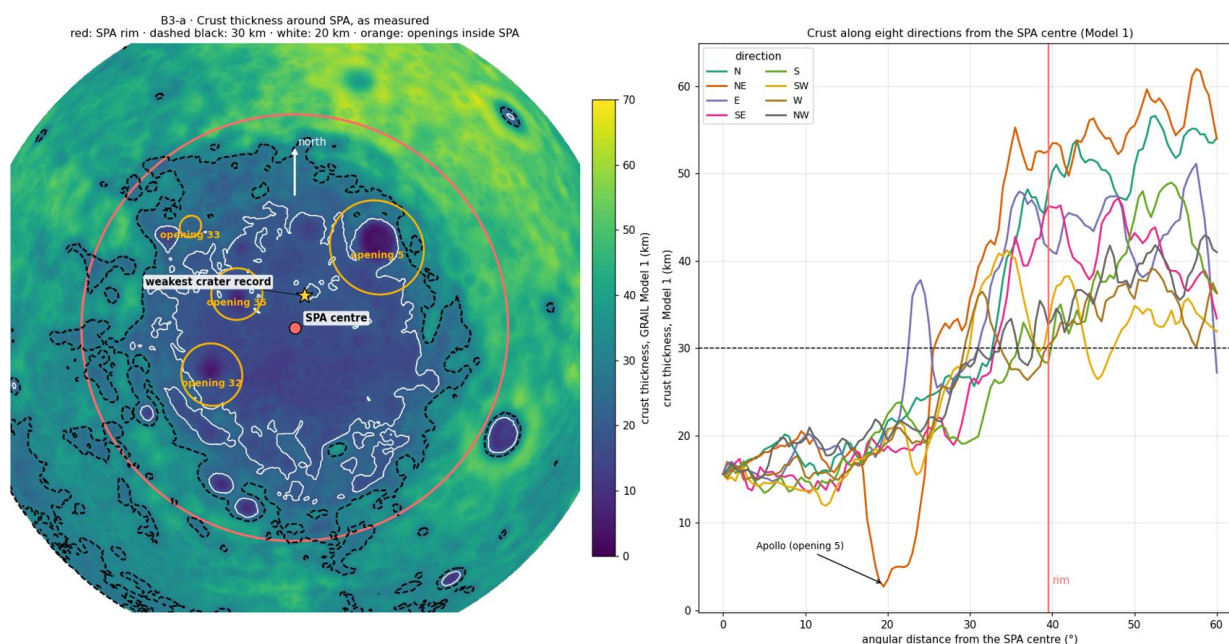
הקרום בתוך SPA הוא הדק ביותר על הירח: 15–28 ק"מ במרכז האגן, לעומת 41–51 ק"מ מחוצה לו (ארבעת מודלי הקרום של GRAIL, Wieczorek et al. 2013). האגן איבד בערך מחצית מקרומו או יותר. עובי הקרום הממוצע בטבעות סביב מרכז SPA:

טבעת ממרכז SPA	מודל 1	מודל 2	מודל 3	מודל 4
0–5°	16.0	15.8	24.1	22.9
5–10°	16.4	16.3	24.5	23.4

22.9	24.0	16.0	16.2	15°–10
24.2	25.3	17.4	17.5	20°–15
28.7	29.4	21.7	21.5	25°–20
34.2	34.7	27.0	26.5	30°–25
42.2	42.3	34.3	33.4	35°–30
49.5	49.2	40.9	39.5	39.6°–35 (השפה)
50.5	50.1	42.0	40.6	45°–39.6 (מחוץ לאגן)
51.9	51.5	43.4	41.9	50°–45

ק"מ, כל הקרקע. ככל שהתא אדום יותר, הקרום דק יותר.

קראו את הטבלה למעלה למטה. הטבעות נמדדות במעלות קשת ממרכז האגן (מעלה אחת היא כ-30 ק"מ על הירח), ושפת האגן היא המעגל שב-39.6°. בכל המודלים הקרום שטוח ודק עד 15°, כ-16 ק"מ במודלים 1–2 וכ-23–24 ק"מ במודלים 3–4; אחר כך הוא מתעבה בהדרגה לאורך 20°–35°, מגיע לערך שמחוץ לאגן בשפה, וכמעט אינו משתנה מעבר לה. ארבעת המודלים נבדלים בכ-8 ק"מ ברמתם הכוללת, אבל צורת הפרופיל — רצפה דקה ושטוחה, דופן עולה, רמה עבה בחוץ — זהה בכל הארבעה. הצבעים עוברים מאדום בראש הטבלה לחיוור בתחתיתה: כיוון שינוי יחיד, מן המרכז החוצה.



איור B3.1. הקרום סביב SPA כפי שנמדד (GRAIL, מודל 1). משמאל: מפת עובי הקרום (אדום: השפה; שחור מקווקו: 30 ק"מ; לבן: 20 ק"מ; כתום: פתחים בתוך SPA). מימין: הקרום לאורך שמונה כיוונים ממרכז האגן. עד כ-20° כל הכיוונים דומים (15–20 ק"מ); הצניחה החדה לצפון-מזרח היא אגן Apollo (פתח 5).

המפה שמשמאל מראה היכן שוכן הקרום הדק; הפרופילים שמימין מראים שהרצפה הדקה זהה בכל כיוון עד כ-20°. היוצא מן הכלל היחיד, הצניחה החדה לצפון-מזרח, אינו הקרום של SPA עצמו אלא החור שחפר אגן צעיר יותר בתוכו, Apollo. זה מה שחייב את הניקוי המתואר להלן.

כיצד מדדנו. מפת הקרום מראה שהאגנים הצעירים בתוך SPA — הפתחים — חפרו "חורים" משלהם בקרום הדק, ואלה מזהמים את התמונה של SPA עצמו. (פתח, בסדרה זו, הוא ים מעל כיפת הזנה: מקום שבו חומר

עלה מלמטה וישבו הקרום נפתח; מאמר 5). אם משאירים אותם, הנקודה הדקה ביותר במפה הגולמית נופלת פשוט בעמוק שבחורים האלה, Apollo, ואינה אומרת דבר על SPA. לכן בחנו את קרום SPA בלי הפתחים ובלי מישורי הלבנה. התוצאות זהות גם כאשר מסירים בנוסף מכתשים של 20 ק"מ ומעלה, ובכל ארבעת המודלים.

מה נמדד — SPA עצמו	תוצאה
הנקודה הדקה ביותר (החלקה של 300 ≈ ק"מ על הקרקע שנותרה)	≈61° דרום, 184° מזרח; 12–13 ק"מ (מודלים 1–2), 18–20 ק"מ (מודלים 3–4); ≈270–285 ק"מ דרומית למרכז
מרכז האזור שבו הקרום דק מ-30 ק"מ	≈57–58.5° דרום, 185–191° מזרח; 150–190 ק"מ דרומית למרכז
המרחק בין השניים	≈120 ק"מ — 5% מקוטר האגן
שטח האזור הדק מ-30 ק"מ	1.8–2.9 מיליון קמ"ר; רוחב שקול ≈1,500–1,900 ק"מ

טבלה: מרכז הקרום הדק של SPA עצמו, לאחר הסרת הפתחים ומישורי הלבנה (B3).

הטבלה נותנת שתי דרכים בלתי תלויות למציאת "האמצע" של הקרום הדק של SPA. הראשונה היא נקודה: הקרום ממוצע על פני חלונות ברוחב כ-300 ק"מ, כך שאף חור קטן יחיד אינו מכריע את התשובה, ונבחר החלון שבו הקרום הדק ביותר. השנייה היא שטח: כל הקרקע שבה הקרום דק מ-30 ק"מ מותווית, ונמצא מרכזו של השטח הזה, כפי שמוצאים את מרכז הכובד של צורה גזורה. השתיים נמצאות במרחק של כ-120 ק"מ זו מזו — 5% מאגן שרוחבו 2,400 ק"מ — ולכן הן מתארות אותו מקום, ושתיהן נמצאות דרומית למרכז הנומינלי (53° דרום, 191° מזרח). האזור הדק מ-30 ק"מ מכסה 1.8–2.9 מיליון קמ"ר, שטחה של דיסקה ברוחב כ-1,500–1,900 ק"מ (גרסה קודמת נתנה כ-1,900 ק"מ, הקצה העליון): רוב האגן.

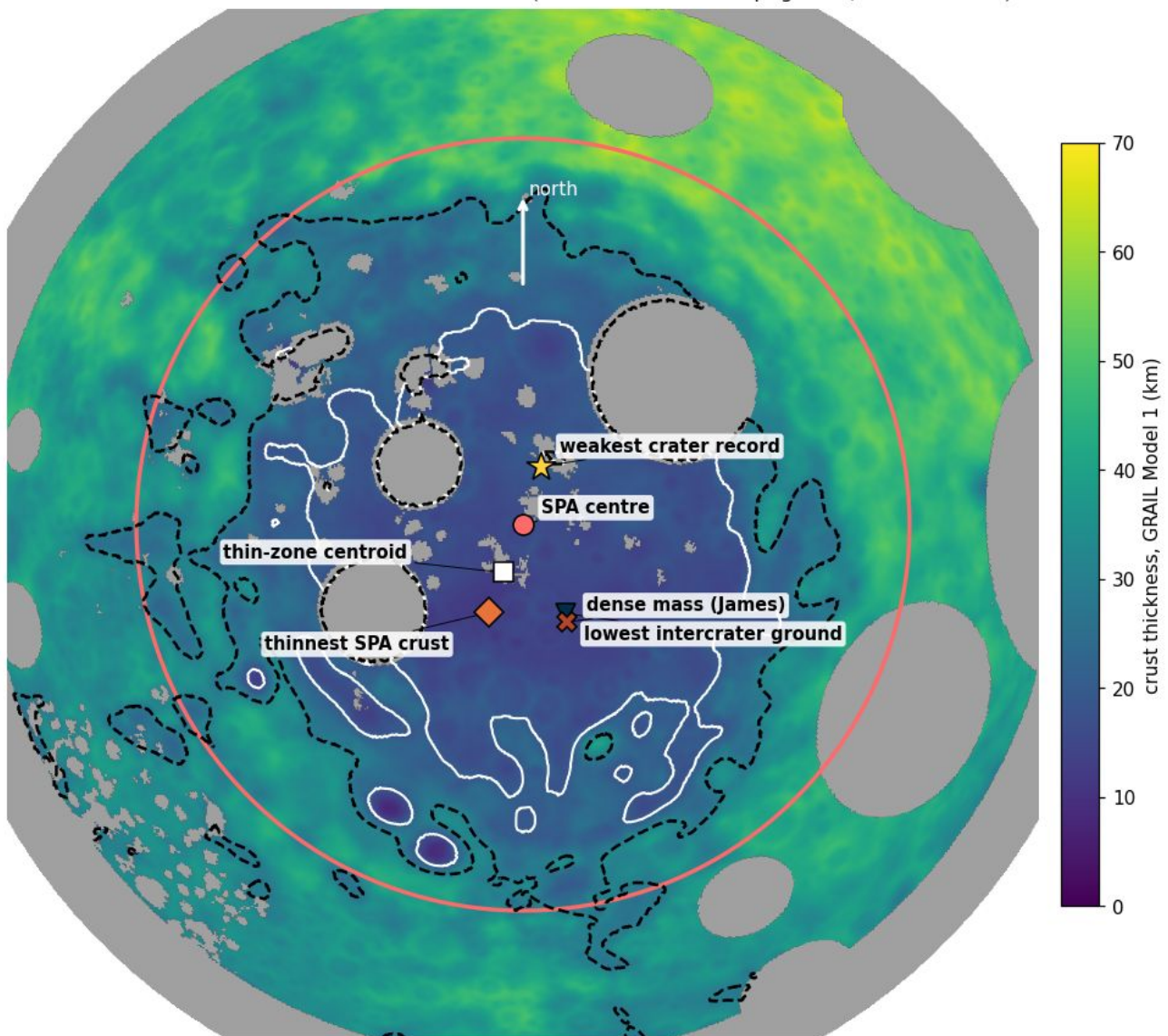
המרחק מן המרכז שבו הקרום עובר את 30 ק"מ, לפי כיוון (חציון בכל גזרה, SPA עצמו):

כיוון	מודל 1	מודל 4
צפון	30°	25°
צפון-מזרח	24°	24°
מזרח	30°	23°
דרום-מזרח	34°	32°
דרום	37°	27°
דרום-מערב	33°	27°
מערב	32°	27°
צפון-מערב	29°	24°

ככל שהתא אדום יותר, האזור הדק מגיע רחוק יותר באותו כיוון. במודל 1 הוא הרחב ביותר בדרום (37°) והצר ביותר בצפון-מזרח (24°); במודלים 3–4 ההבדלים קטנים יותר.

טבלה זו נותנת את קו המתאר של האזור הדק. בהליכה מן המרכז החוצה לאורך כל אחד משמונה כיוונים, היא רושמת כמה רחוק מגיעים לפני שהקרום נעשה עבה מ-30 ק"מ. אילו האזור הדק היה מעגל שמרכזו במרכז האגן, כל שמונת המספרים היו שווים. הם אינם שווים: במודל 1 האזור הדק הקצר ביותר לכיוון צפון-מזרח (24°), במודל 4 לכיוון מזרח וצפון-מזרח (23–24°), ובמודל 1 הוא מגיע הכי רחוק לכיוון דרום (37°). האזור נמשך דרומה ונצבט בצד הצפון-מזרחי; זו הסיבה שמרכזו נמצא דרומית למרכז האגן.

B3-b · SPA's own thin crust — openings and lava plains removed (grey)
 red: SPA rim · dashed black: 30 km · white: 20 km (smoothed over the kept ground, GRAIL Model 1)



איור B3.2. הקרום הדק של SPA עצמו, לאחר הסרת הפתחים ומישורי הלבנה (באפור). הקרום הדק ביותר (מעטין כתום) ומרכז האזור הדק (ריבוע) נמצאים דרומית למרכז האגן, סמוך לקרקע הנמוכה ביותר ולמסה הצפופה. הכוכב מסמן את רשומת המכתשים החלשה ביותר, 175 ק"מ צפונית למרכז.

איור B3.2 מציב את שתי הנקודות הדרומיות על מפה אחת, ואיתן, להשוואה, את רשומת המכתשים של B1. הכוכב הוא רשומת המכתשים החלשה ביותר על הקרקע של איור זה, שממנה הוסרו הפתחים ומישורי הלבנה; זהו מדד שונה מן המינימום של B1e (כ-270 ק"מ צפון-צפון-מזרח למרכז), הנקרא ממפת צפיפות רציפה על קרקע שנוקתה מ-34 הימות ומהילה של 200 ק"מ סביב כל אחד מהם. שניהם נמצאים בצד הצפוני של המרכז, ואילו נקודות הקרום נמצאות בצדו הדרומי.

STEP 2 החידה

מדוע הקרום דק כל כך, ומדוע מרכזו של האזור הדק אינו במרכז האגן אלא דרומית לו, ונקודתו הדקה ביותר בדרום?

STEP 3 מה המדע אומר

בקריאה המקובלת SPA הוא אגן פגיעה, והקרום הדק שלו הוא החור שהותירה החפירה. הפגיעה שיצרה את SPA חפרה את הקרום והשליכה אותו החוצה. במודלים של פגיעה אלכסונית הנעה דרומה — הכיוון שמציעות

רוב העבודות האחרונות (Andrews-Hanna et al. 2025; Wakita et al. 2026) — האזור הדק מוארך לאורך המסלול ומצטמצם לכיוון דרום, עם מעבר הדרגתי בצד הדרומי (גם Citron et al. 2024). פגיעה אלכסונית, כזו הפוגעת בזווית ולא ישר מלמעלה, אינה חופרת חור סימטרי: היא חופרת עמוק יותר וארוך יותר בכיוון התנועה, ולכן האזור הדק נמשך לאותו כיוון. אף מודל אינו מנבא נקודה דקה ביותר מסוימת; המודלים מנבאים את צורת האזור הדק. הקרום שכמעט אינו קיים ב-Apollo מוסבר בפגיעת Apollo עצמה, מאוחרת וקטנה יותר, שחפרה שוב בתוך SPA (Potter et al. 2018).

STEP 4 היכן המדע אינו מספיק

כאן המדע עומד. אין לו דרישה שמודליו אינם עומדים בה, ואין נקודה שהוא מנבא ושלא נמצאה. תיבות פסק הדין החותמות את שלבים 4 ו-6 נוהגות לפי התבנית שנקבעה בראש חלק B: המדע נשפט לפי אמות המידה שלו (מסביר, מסביר בחלקו, מסביר בקושי, אינו מסביר), המודל לפי שלו (מתאים, מתאים בחלקו, פתוח), ואף תיבה אינה משווה את האחד לשני.

הכרעת המדע: מסביר

אזור דק השוכן דרומית למרכז ומתרחב לכיוון דרום מתאים לפגיעה הנעה דרומה, ו-Apollo מוסבר בפגיעה משלו.

STEP 5 מה המודל אומר

במודל SPA הוא המקום שבו חום הברנר הגיע אל הצד הרחוק: מקור חום מתחת לצד הרחוק, מול הפתחים של הצד הקרוב, כש-Imbrium היא היציאה העיקרית שלו ו-Serenitatis היציאה המשנית (A.5). הקרום שם דק משום שהחום הזה הסיר אותו. החום מלמטה יצר את הקרום הדק בשלוש דרכים:

החלקה מן הכיפה. האזור, שנדחף וחומם מלמטה, התרומם לכיפה, והקרום שהתרכך החליק ממנה אל הצדדים בהשפעת הכבידה. קרום שמחומם מאבד את קשיחותו; על משטח מורם ומשופע הוא זוחל במורד, כפי ששכבת שעווה מרוככת זולגת במורד צדי כיפה מחוממת.

דחיפה החוצה בידי החום. חומר חם לוחץ חזק יותר מחומר קר: חלקיקים מהירים דוחפים חלקיקים איטיים. החומר החם שעלה מלמטה התפשט והתפרש לצדדים מתחת לקרום, ודחף אותו מן המרכז החם אל השוליים.

התכה מלמטה. בסיס הקרום הותך בידי החום.

שתי הדרכים הראשונות מזיזות קרום הצידה, מן המרכז אל השוליים; השלישית מסירה אותו במקומו, מלמטה. שתיים מהן מוצגות להלן במספרים, כדי שהקורא יראה שכל אחת מהן אפשרית פיזיקלית בזמן שעמד לרשותה.

הפיזיקה של הדחיפה החוצה (מנגנון 2). לחץ תרמי. הטמפרטורה היא מדד לאנרגיה הקינטית של החלקיקים; בגז $p = nkT$, והלחץ עולה עם הטמפרטורה. בחומר מוצק או צמיגי, שאינו יכול להתפשט בחופשיות, חימום יוצר לחץ:

$$\Delta p = \alpha K \Delta T$$

במילים: חומר שמחומם ב- ΔT מנסה לגדול בנפחו בשבר $\alpha \Delta T$, כאשר α הוא מקדם ההתפשטות התרמית שלו. אם סביבתו מונעת ממנו לגדול, הרי זה כאילו נדחס חזרה באותו שבר, והלחץ הנדרש לכך הוא השבר הזה כפול מודול הנפח K , התנגדות החומר לדחיסה. אותו דבר קורה כאשר מחממים מים במיכל אטום ומלא לגמרי: הם אינם יכולים להתפשט, ולכן לחצם עולה עד שהמיכל נכנע. הטבלה נותנת את הערכים עבור חומר סיליקטי:

גודל	ערך עבור חומר סיליקטי	סוג
α — התפשטות תרמית נפחית	$2-4 \times 10^{-5}$ לקלווין	ערך מקובל
K — מודול נפח	100–70 ג'יגה-פסקל	ערך מקובל
αK	1.4–4 מגה-פסקל לקלווין	נגזר
חימום ב-300 קלווין	0.4–1.2 ג'יגה-פסקל	נגזר
חוזק לחיצה	≈ 0.2 ג'יגה-פסקל	ערך מקובל

טבלה: הלחץ התרמי בחומר סיליקטי (B3, מנגנון 2).

חימום בכמה מאות קלווין יוצר לחץ הגדול פי 2–6 מחוזק הלחיצה (גרסה קודמת נתנה αK של 2–3 מגה-פסקל לקלווין, 0.6–0.9 ג'יגה-פסקל ופי 3–4, שהם הערכים המרכזיים של הטווחים האלה) — הלחץ הגדול ביותר שהחומר יכול לשאת לפני שהוא נכשל; החומר אינו יכול לעמוד בו, והחומר החם נדחף החוצה, אל הקר.

התפרשות צידית מתחת לקרום. חומר חם קל יותר: $\Delta\rho = \rho\alpha\Delta T \approx 30$ ק"ג/מ"ק בחימום של 300 קלווין. ראש של חומר חם בעובי h מפעיל מאמץ צידי $\sigma \approx \Delta\rho gh \approx 5$ מגה-פסקל ($h = 100$ ק"מ, $g = 1.6$ מ"ש"²). שכבה של חומר קל יותר המונחת מתחת לסביבה כבדה יותר לוחצת הצידה, כפי שעמוד מים לוחץ על דפנות המיכל שלו; σ היא הדחיפה הצידית הזאת, הנקבעת בהפרש הצפיפות, בכבידת הירח g ובעובי השכבה החמה. מהירות ההיענות של החומר לדחיפה תלויה בצמיגותו — התנגדותו לזרימה, גבוהה מאוד בחומר מוצק חם הזוחל לאט לאורך זמנים ארוכים. בצמיגות של 10^{20} פסקל-שנייה זהו קצב עיוות של ≈ 1.5 למיליון שנה: בתוך מיליוני שנים החומר נע מרחקים בסדר גודל של עובי השכבה עצמה, וזה מספיק כדי להעביר קרום מן המרכז אל השוליים.

החוק השני של התרמודינמיקה קובע את הכיוון: חום זורם מחם לקר (חוק Fourier, $q = -k\nabla T$), ויחד איתו נוצר הפרש לחצים מחם לקר ($\nabla p = \alpha K \nabla T$) הדוחף חומר באותו כיוון. לשני החוקים אותה צורה: היכן שהטמפרטורה יורדת (∇T , שיפוע הטמפרטורה), החום זורם במורד השיפוע הזה, והלחץ יורד יחד איתו, כך שהדחיפה על החומר מכוונת לאותו צד כמו זרימת החום — מן המרכז החם אל השוליים הקרירים.

דיפוזיה תרמית — אפקט Soret. בתערובת שיש בה הפרש טמפרטורה, רכיבים נעים גם בגלל הטמפרטורה עצמה:

$$J = -\rho D (\nabla w + w(1-w) S_T \nabla T)$$

כאן J הוא זרם של רכיב אחד, w חלקו בתערובת, D מקדם הדיפוזיה שלו ו- S_T מקדם Soret. האיבר הראשון הוא דיפוזיה רגילה, המשווה הבדלי הרכב; השני הוא זרם המונע בהפרש הטמפרטורה בלבד, ויכול לבנות הבדלי הרכב. במאגמות סיליקטיות $10^{-3} \approx S_T - 10^{-2}$ לקלווין (Leshner & Walker 1986). מגבלותיו: הוא איטי — $D \approx 10^{-11}$ מ"ר/ש' מזיז חומר, למרחק של כ- $\sqrt{Dt}$, רק מטרים ספורים בעשרות אלפי שנים וכחצי קילומטר במיליארד שנה (גרסה קודמת נתנה מאות מטרים ועשרות קילומטרים; אומדן השורש הריבועי קטן עוד יותר, וזה רק מחזק את המסקנה) — ולכן אין הוא מה שדחף את הקרום. ובניסויים הסיליקה מתרכזת בצד החם, בעוד הברזל והמגנזיום נעים אל הצד הקר, ההפך מן הרצפה העשירה בברזל של מרכז SPA, ולכן הוא אינו מסביר את הברזל. תפקידו בהפרדת הרכב מקומית בתוך שכבות שבושלו זמן רב.

הפיזיקה של ההתכה מלמטה (מנגנון 3). שימור האנרגיה (החוק הראשון) ותנאי Stefan לחזית ההתכה. כדי להתיר קרום בעובי h יש לחמם אותו עד ההתכה ואז להתיר אותו:

$$E = \rho (c_p \Delta T + L) h, \quad v = \frac{q}{\rho (c_p \Delta T + L)}$$

המשוואה הראשונה היא תקציב: כל קילוגרם קרום צריך $c_p \Delta T$ כדי להתחמם עד נקודת ההתכה שלו (c_p הוא החום הדרוש לחימום קילוגרם אחד בקלווין אחד), ואחר כך L , החום הכמוס, כדי להפוך ממוצק להתך; כפול הצפיפות ρ והעובי h , זה נותן את האנרגיה E לכל מטר רבוע של פני שטח. המשוואה השנייה היא תנאי Stefan: שטף חום q המגיע מלמטה מזיז את חזית ההתכה כלפי מעלה במהירות v , השטף מחולק באנרגיה שכל מטר מעוקב צריך.

גודל	ערך
L — חום כמוס של התכה	ג'ול/ק"ג 4×10^5
$c_p \Delta T$ — חימום ב-800 קלווין	ג'ול/ק"ג 8×10^5
ρ — צפיפות הקרום	ק"ג/מ"ק 2,900
האנרגיה להתכת 20 ק"מ קרום	ג'ול/מ"ר $\approx 7 \times 10^{13}$
טבלה: תקציב האנרגיה להתכת הקרום (B3, מנגנון 3).	

שטף חום מלמטה	זמן להתכת 20 ק"מ
0.5 ואט/מ"ר (פי 25 מן השטף של היום)	מיליון שנה ≈ 4.4
0.1 ואט/מ"ר	מיליון שנה ≈ 22
טבלה: זמן ההתכה בשני שטפי חום (B3, מנגנון 3).	

הטבלה השמאלית (הראשונה) בונה את התקציב; הטבלה הימנית (השנייה) מחלקת אותו בשני שטפי חום. הזמן הוא פשוט האנרגיה למטר רבוע מחולקת בחום המגיע בכל שנייה לכל מטר רבוע. אפילו השטף הנמוך, 0.1 ואט/מ"ר, מתיך את 20 הק"מ בכ-22 מיליון שנה.

התכת 20 ק"מ קרום מלמטה נמשכת מיליוני עד עשרות מיליוני שנים — קצר בהרבה מן הזמן שבו פעל הברנר; המנגנון פועל גם בשטף חום מתון.

הערכים הם סדרי גודל עם פרמטרים מקובלים לחומר סיליקטי (התפשטות, מודול נפח, צמיגות, שטף חום), המסומנים כהנחות (ADOPTED). הם מראים שהמנגנונים אפשריים; הם אינם מחשבים במדויק מה קרה.

מה עלה בגורל הקרום והכיפה. הקרום שנדחף החוצה נערם סביב האגן — הטבעת המעובה (B4). החום היה החזק ביותר במרכז הכיפה, שמתחתיה עלה; הוא התיך את החלקים העבים והדקים של האזור כאחד, והקרום הדק ביותר נותר בדרום, שם הקרום המקורי היה דק יותר (B4). בבסיס האזור החומר נושא הברזל שהגיע מכדור הארץ נשאר, והתרכז כשחומרים אחרים עזבו (B10). מקור החום נרגע עם הרפיית הפחיסות, לפני השחרור מכדור הארץ; לאחר הניתוק פעל רק חום שיורי, שדעך לאט. ככל שהגוף התרחק אל החלל הלך הקירור והתחזק ושינה את המבנה: השכבות שבושלו עברו דחיסה והתכווצו, והאזור המורם שקע לכדי שקע. הקרום הדק הוא אפוא סימן של החום, ולא תנאי מוקדם לו: הברנר לא חיפש מקום שבו הקרום כבר היה דק; הוא עשה את הקרום דק במקום שבו פעל.

הפתחים בתוך SPA הושפעו מאוד מן הברנר והשפיעו על סביבתם, כך שמבחינה סטטיסטית הם דומים לעתים למרכז האגן; הם רעש המסתיר את המבנה של SPA עצמו.

המודל מנבא קרום דק בכל האזור המחומם, הדק ביותר היכן שהקרום המקורי היה דק, ושם גם את הקרקע הנמוכה ביותר; וברזל מרוכז בבסיס האזור.

STEP 6 כיצד זה מתאים למודל

המבנה של SPA מתקבץ בדרומו: הקרום הדק ביותר של SPA ($\approx 61^\circ$ דרום, 184° מזרח), הקרקע הנמוכה ביותר שבין המכתשים (61° דרום, 199° מזרח, B2) והמסה הצפופה (62° דרום, 200° מזרח, B10) שוכנים כולם בדרום, בתוך ≈ 230 ק"מ זה מזה (גרסה קודמת נתנה ≈ 200 ק"מ). שלוש מדידות בלתי תלויות — קרום מן הכבידה, גובה ממד הגובה הלייזרי על הקרקע שבין המכתשים, ומסה קבורה משדה הכבידה בעומק — נופלות באזור קטן אחד של אגן שרוחבו 2,400 ק"מ.

מרכז האזור הדק והנקודה הדקה ביותר כמעט חופפים — 5% מקוטר האגן.

הסרת הפתחים מנקה את התמונה, כפי שהמודל מצפה: בלי "החורים" של הפתחים מופיע המבנה של SPA עצמו.

נקודה אחת נשארת פתוחה: רשומת המכתשים החלשה ביותר שוכנת בצד הצפוני של האזור הדק, ≈ 450 ק"מ מן הנקודה הדקה ביותר; סביב הנקודה הדקה ביותר הרשומה חזקה ($0.82\text{--}1.10$) — כלומר 0.82 עד 1.10 מצפיפות המכתשים ממש מחוץ לשפה, קרוב לרגיל. מדוע זה כך נשאר פתוח כאן; B4 חוזר לכך.

הכרעת המודל: מתאים

הקרום הדק ביותר של SPA, הקרקע הנמוכה ביותר שלו והמסה הצפופה שוכנים יחד בדרום, בתוך כ-230 ק"מ זה מזה, בתוך האזור המחומם, בצדו הדרומי הדק.

מה זה מראה. הפתחים מזהמים את מדידת הקרום כפי שמכתשים מזהמים את מדידת הגובה: Apollo לבדו יצר את "הנקודה הדקה ביותר" של המדידה הגולמית. ל-SPA יש דרום מבני — הקרום הדק ביותר, הקרקע הנמוכה ביותר והמסה הצפופה, שלושתם יחד — B2 ו-B3 מצביעים על אותו מקום. הצפון שייך לרשומת המכתשים החלשה, הדרום למבנה; שניהם שוכנים בתוך אותו אזור של קרום דק.

בהנחה שהאגן נוצר בפגיעה אלכסונית הנעה דרומה, המדע מסביר את B3 היטב — את הקרום הדק ואת מיקומו דרומית למרכז. הסבר זה תלוי בהנחת הפגיעה; B3 לבדו אינו מכריע בין ההסברים, אבל הוא מראה היכן שוכן גוף האגן.

נתונים וקוד.

נתונים	מקור
עובי הקרום	GRAIL, ארבעת המודלים של Wieczorek et al. 2013, רשת של 0.25°
פתחים ולבה	36 הפתחים (נדגמו מן המפה שלנו, רדיוסים מקטלוגים); LROC
מכתשים (בדיקה נוספת)	Robbins 2019, $20 \geq$ ק"מ, שוליים של 1.5 רדיוסים
בדיקה בלתי תלויה	Paper8_B3_Thin_Crust (30.9.2026): מרכז האזור הדק 103–112 ק"מ דרום-דרום-מערב (כל הקרקע); Apollo 3.9–8.5 ק"מ בחלון מעגלי של 150 ק"מ
קוד	b3clean.py, b3figs.py
פיזיקה	ערכים מקובלים לחומר סיליקטי; מקדם Soret: Lesher & Walker 1986 (טרם נבדק מול המקור)

טבלה: נתונים וקוד של B3.

הבדיקה הבלתי תלויה נעשתה על כל הקרקע, כולל הפתחים; שם מרכז האזור הדק נמצא 103–112 ק"מ דרום-דרום-מערב, קרוב יותר למרכז האגן מאשר על הקרקע המנוקה אבל באותו כיוון, והקרום של Apollo, 3.9–8.5 ק"מ, הוא הדק ביותר במפה הגולמית — הזיהום שהניקוי מסיר.

פתוח. מדוע רשומת המכתשים החלשה שוכנת בצפון ולא בנקודה הדקה ביותר — נשאר פתוח במכוון. רדיוס האזור הדק בדרום תלוי במודל: במודלים 3–4 הקרום עובר את 30 ק"מ כבר ב-19.5° ואחר כך יורד שוב (בדיקה בלתי תלויה). עובי הקרום בנקודה הדקה ביותר תלוי באופן שבו מוגדרת ההחלקה. רדיוסי 36 הפתחים עדיין טעונים בדיקה.

B4 הטבעת החיצונית

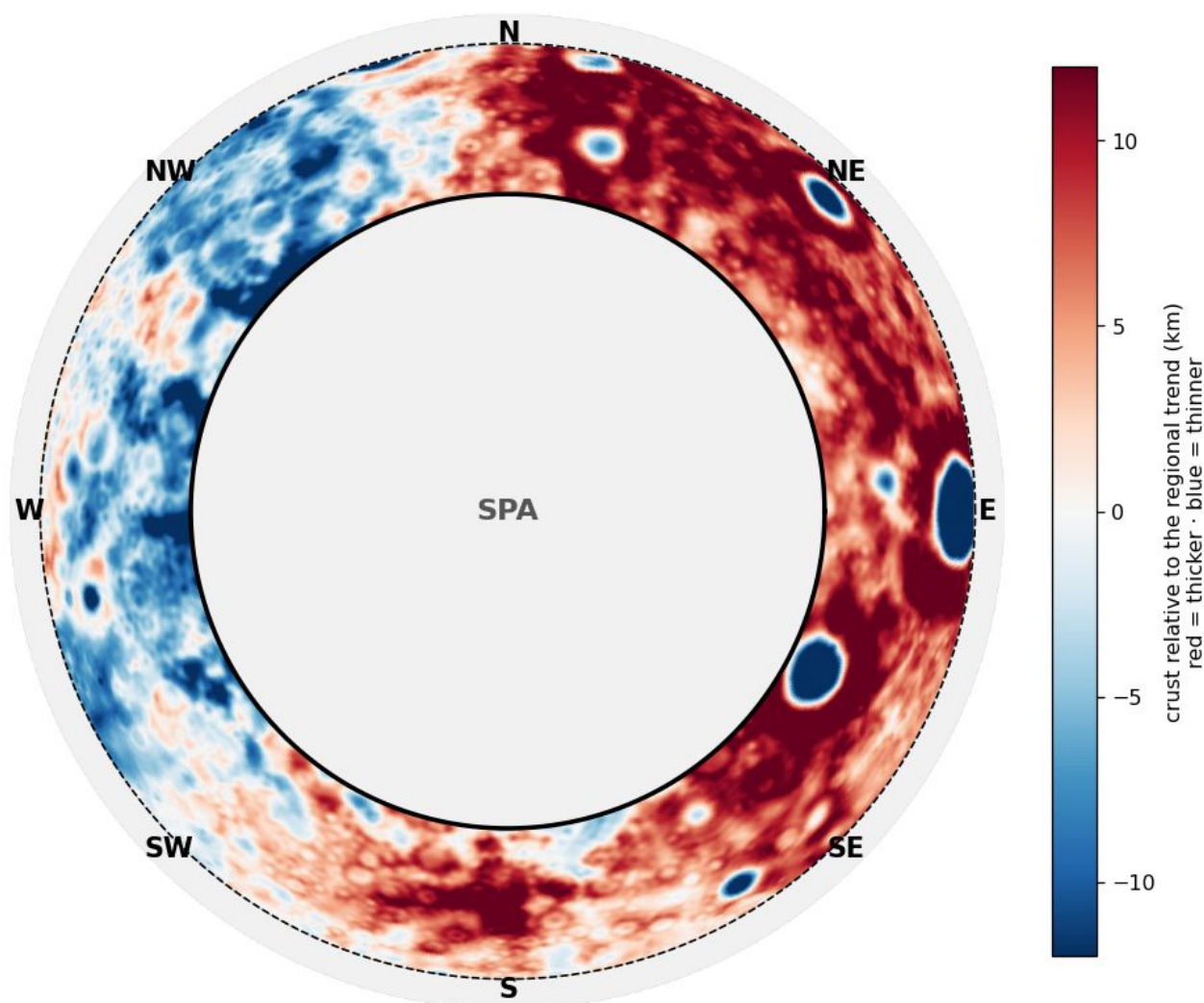
B3 מצא שהקרום בתוך SPA דק. קרום שהוסר ממקום אחד חייב ללכת לאנשהו, או להיהרס. B4 מחפש אותו סביב האגן, ומוצא טבעת של קרום מעובה. שתי הקריאות מצפות לטבעת כזאת: בקריאת הפגיעה היא החומר שהושלך מן המכתש; במודל היא הקרום המרוכך שהחליק ונדחף החוצה מן הכיפה המחוממת. מה שמבדיל ביניהן הוא צורת הטבעת — היכן היא עבה והיכן היא חסרה.

בקצרה. סביב SPA הקרום בולט בטבעת, 50°–55° ממרכזו. בתוך האגן הקרום אחיד בכל הכיוונים (15°–19 ק"מ), כמו מאגר מים מפולס; מחוצה לו נשמר פני השטח המקוריים, עבים בצפון-מזרח ודקים בדרום-מערב, והטבעת יורשת אותם. הטבעת היא בליטה מעל פני שטח אלה בכל כיוון חוץ מן המערב.

STEP 1 האנומליה

קרום הירח אינו אחיד גם הרחק מ-SPA: באופן כללי הוא דק יותר בצד הקרוב ועבה יותר בצד הרחוק. כדי לראות תופעה מקומית יש קודם להסיר את המגמה הרחבה הזאת, כפי שמפלסים שולחן משופע לפני שמחפשים בו בליטה. לאחר הסרת המגמה האזורית של הצד הרחוק, הקרום סביב SPA עבה מן הרגיל בכל ארבעת מודלי הקרום של GRAIL: ההתעבות מגיעה לשיא של 3.8–5.7 ק"מ, 50°–55° ממרכז האגן, כ-320–470 ק"מ מעבר לשפה (גרסה קודמת נתנה 350–430 ק"מ), על פני רוחב של כ-450 ק"מ. הטבעת עד 60° מחזיקה רק כ-37% מן הקרום החסר באגן (חושב ב-18 גזרות של 20°, בכל ארבעת המודלים). כלומר, אילו הקרום החסר בתוך השפה היה פשוט מועבר החוצה, הוא היה יוצר טבעת גדולה כמעט פי שלושה מזו שנמצאה.

B4 · The ring around SPA: crust thickness relative to the regional trend
ring 39.6°–70° from the SPA centre (solid: rim; dashed: 70°) · GRAIL Model 1



איור B4.1. הטבעת לבדה: עובי הקרום ביחס למגמה האזורית, 39.6°–70° ממרכז SPA (GRAIL, מודל 1). אדום: עבה מן הרגיל; כחול: דק מן הרגיל. הכתמים הכחולים העגולים בתוך האדום הם אגנים ומכתשים צעירים.

האיור מראה רק את הרצועה שמחוץ לשפה, לאחר הסרת המגמה. הרצועה האדומה היא הטבעת; היא רחבה ורציפה בצד המזרחי ודועכת בצד המערבי.

הכיוון. פירקנו את העובי בטבעת 45°–60° לפי כיוון. בהקפת הטבעת העובי עולה ויורד, ואת ההשתנות הזאת אפשר לפצל לדפוסים פשוטים. הרכיב החד-צדדי הוא טבעת עבה בצד אחד ודקה בצד שמולו, כמו צלחת מוטה; עוצמתו היא בכמה הצד העבה עבה יותר, וכיוונו הוא לאן הצד העבה פונה. הרכיב הדו-צדדי הוא טבעת עבה בשני צדדים נגדיים ודקה בשני הצדדים שביניהם, כמו אליפסה. יש רכיב חד-צדדי חזק — עבה בצד אחד ודק בצד שמולו — ורכיב דו-צדדי חלש יותר. כדי לוודא שהממצא אינו תלוי באופן שבו מוגדרת הטבעת, מדדנו אותו גם על האליפסה של האגן (2050×2400 ק"מ), בשני כיווני ההטיה שפורסמו:

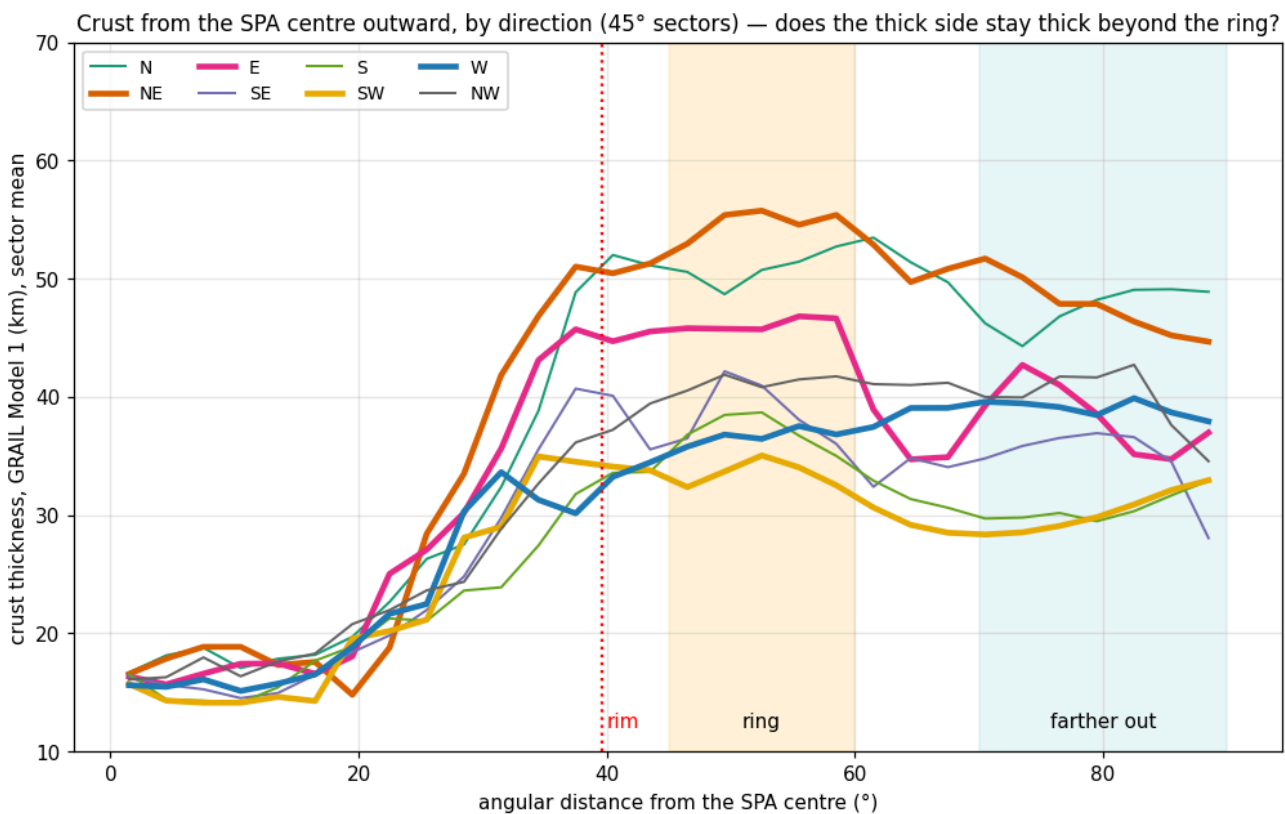
צורת הטבעת	רכיב חד-צדדי (ק"מ)	כיוון הצד העבה	רכיב דו-צדדי (ק"מ)
מעגל (39.6°)	7.8–8.9	96–97°	2.9–3.3
אליפסה, ציר ארוך +18.8°	8.0–9.1	98°	4.3–4.9
אליפסה, ציר ארוך –18.8°	7.7–8.6	98–99°	3.5–4.0

הטווח בין מודל 1 למודל 4. הכיוון נמדד מן הצפון (0°) דרך המזרח (90°). ככל שהתא אדום יותר, האסימטריה חזקה יותר.

כל שורה משרטטת את הטבעת בצורה אחרת: כמעגל, וכאליפסה שפורסמה של האגן, מוטה לצד אחד ולצד האחר. הביטוי בעמודה האמצעית: הצד העבה פונה ל-96°–99° בכל שלוש השורות, כלומר כמעט בדיוק מזרחה. הרכיב החד-צדדי הוא 7.7–9.1 ק"מ בכל השלוש, יותר מפי שניים מן הדו-צדדי.

האסימטריה אינה תלויה בצורה: במעגל ובאליפסה, בשתי ההטיות, הצד העבה הוא המזרח (96°–99°), בעוצמה כמעט זהה.

פני השטח שבהם נוצרה הטבעת. מפת הקרום מראה ש-SPA יושב בשולי הרמות של הצד הרחוק — הקרום העבה ביותר על הירח — מצפון ומצפון-מזרח לו. האסימטריה הפונה מזרחה עשויה אפוא להיות רק השיפוע הזה של הרמות, שהטבעת חוצה במקרה, ולא תכונה של הטבעת. לכן עקבנו אחר הקרום מן המרכז החוצה, עד 90°, בכל כיוון, והשווינו את הטבעת לקרום הרחוק יותר באותו כיוון:



איור B4.2. עובי הקרום מן המרכז החוצה, בשמונה כיוונים (GRAIL, מודל 1). בתוך האגן (0°–20°) כל הכיוונים מתכנסים ל-15–19 ק"מ; מחוצה לו הם מתפצלים ל-28–56 ק"מ. בצפון-מזרח הקרום עבה ונשאר עבה; בדרום-מערב הוא דק ונשאר דק; במזרח יש בליטה ברורה בטבעת; במערב אין.

שמונת הקווים באיור הם שמונה הליכות אל מחוץ לאגן. סמוך למרכז הם מונחים זה על זה; בחוץ הם נפרשים כמניפה, כל אחד לעבר העובי של האזור שאליו הוא נכנס. השאלה היא אם קו עולה בטבעת ויורד שוב מעבר לה — בליטה — או רק מטפס לעבר הרמה האזורית שלו.

כיוון	הטבעת (45°–60°)	רחוק יותר (70°–90°)	בליטת הטבעת
צפון	50.9	47.6	+3.3
צפון-מזרח	54.8	47.4	+7.4
מזרח	46.2	38.4	+7.8

דרום-מזרח	38.7	34.8	+3.9
דרום	37.1	30.6	+6.5
דרום-מערב	33.5	30.4	+3.2
מערב	36.7	39.0	-2.3
צפון-מערב	41.3	39.7	+1.6

ק"מ, מודל 1 (מודל 4 דומה: ממוצע +4.4). ככל שהתא אדום יותר, הבליטה גדולה יותר; כחול: הטבעת דקה מסביבתה.

העמודה האחרונה היא הטבעת פחות הקרום הרחוק יותר באותו כיוון. השוואת כל כיוון לעצמו מסירה את שיפוע הרמות: כיוון שהוא עבה משום שהרמות עבות שם, עבה גם בטבעת וגם מעבר לה, וההפרש מתבטל. מה שנשאר הוא הגובה של הטבעת עצמה. שבעה משמונת התאים אדומים; רק המערב כחול.

פני השטח עצמם משופעים — עבים בצפון-מזרח ודקים בדרום-מערב, הרבה מעבר לטבעת; הטבעת נוצרה בתוך שיפוע שכבר היה קיים.

הטבעת היא בליטה אמיתית מעל פני שטח אלה — 4.4–3.9 ק"מ בממוצע — בשבעה משמונה כיוונים.

האסימטריה של הבליטה עצמה גדולה בערך במחצית: 4.4–3.7 ק"מ (לעומת 8.9–7.8 ק"מ על קו הבסיס האזורי), ועדיין לכיוון מזרח. במערב אין בליטה. כמחצית מן האסימטריה הפונה מזרחה שייכת אפוא לפני השטח שבהם נוצרה הטבעת, וכמחצית לטבעת עצמה.

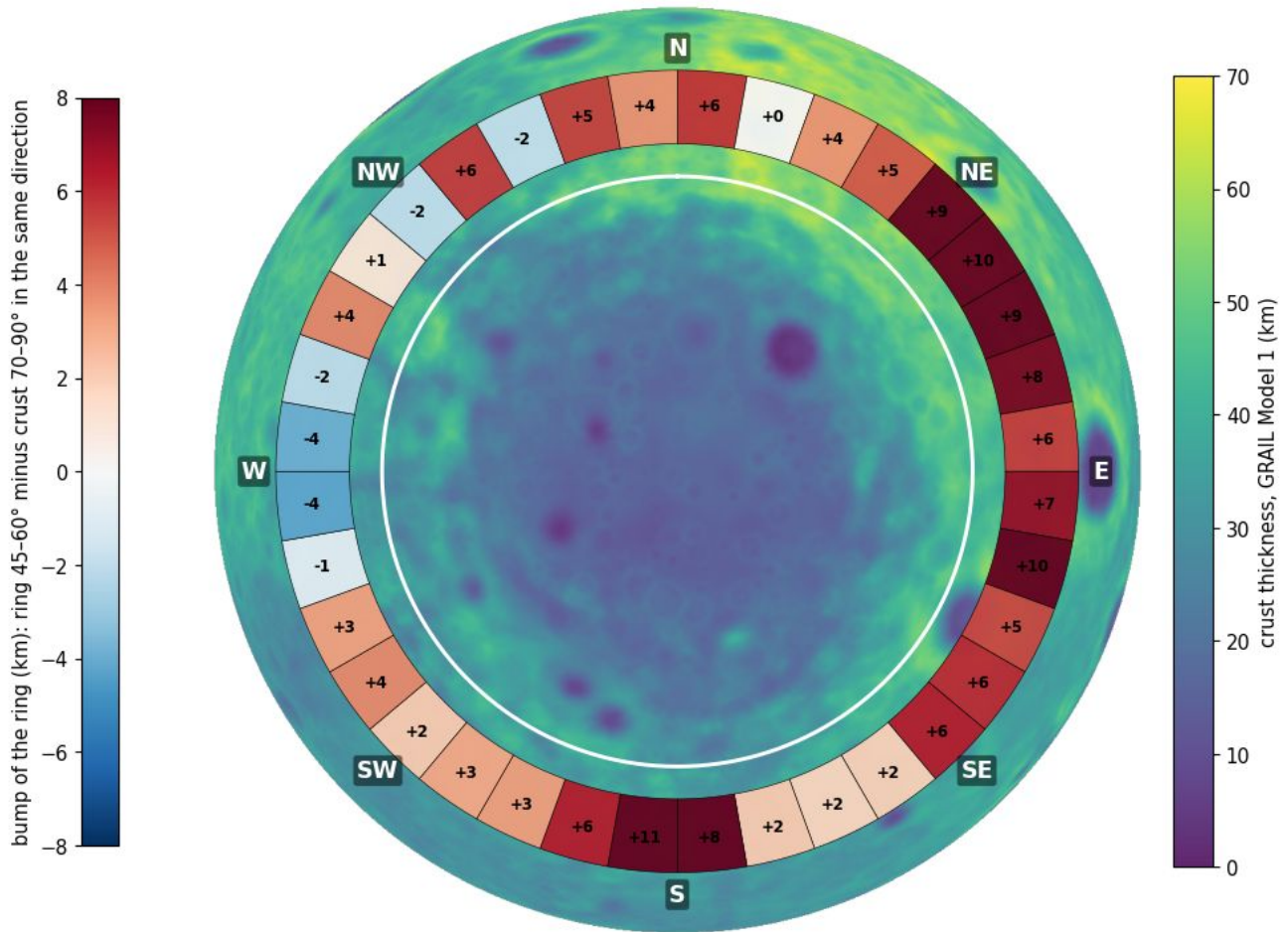
הבליטה נראית גם בגובה, ולא רק במודל הקרום (LOLA, הטבעת מול 70°–90° באותו כיוון):

כיוון	צ	צ"מ	מז	ד"מ	ד	ד"מע	מע	צ"מע
בליטה בגובה (ק"מ)	+0.98	+1.93	+1.59	+1.11	+1.17	+0.41	-0.50	+0.59

טבלה: בליטת הטבעת בגובה פני השטח לפי כיוון (LOLA). צ — צפון, צ"מ — צפון-מזרח, מז — מזרח, ד"מ — דרום-מזרח, ד — דרום, ד"מע — דרום-מערב, מע — מערב, צ"מע — צפון-מערב.

זה חשוב משום שעובי הקרום הוא מודל הבנוי על כבידה ועל צפיפויות משוערות, ואילו הגובה נמדד ישירות בלייזר. השניים בלתי תלויים, והם מסכימים: פני השטח מעל הטבעת עומדים גבוה עד כ-2 ק"מ מפני השטח שמעבר לה, הכי גבוה בצפון-מזרח ובמזרח, ובמערב הם עומדים נמוך יותר.

Where the ring stands above its surroundings, and where it does not
(10° segments; red = bump, blue = no bump; white circle = SPA rim)



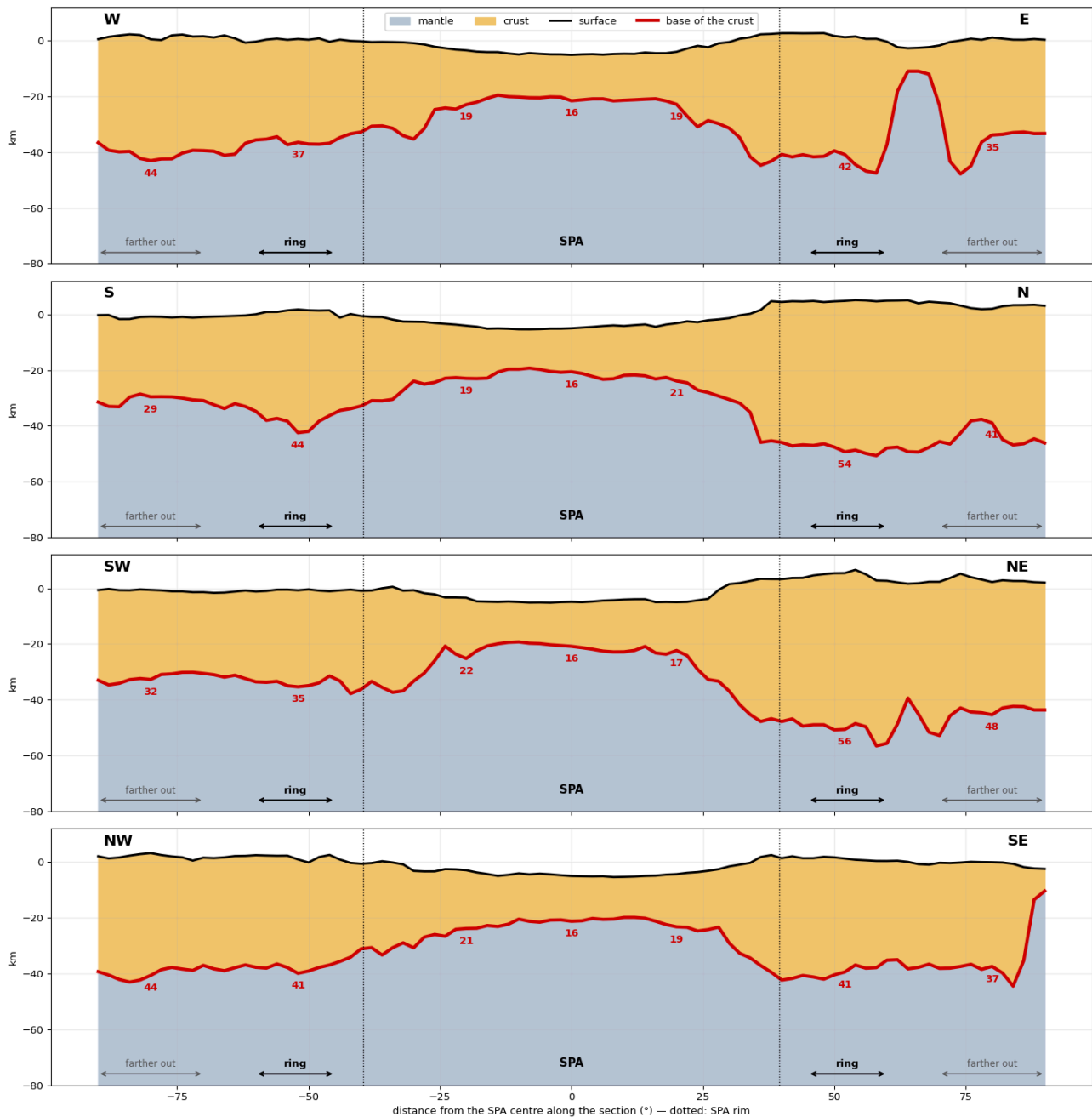
איור B.4.3. היכן הטבעת עומדת מעל סביבתה: 36 קטעים של 10°; בכל אחד, בכמה קילומטרים הטבעת (45°–60°) עבה מן הקרום הרחוק יותר באותו כיוון (70°–90°). אדום: בליטה; כחול: אין בליטה. אין בליטה במערב, 250°–290° (–1 עד –4 ק"מ); הבליטה החזקה ביותר בצפון-מזרח (+8 עד +10), במזרח (+10) ובדרום (+8 עד +11).

האיור חוזר על ההשוואה של הטבלה בצעדים עדינים יותר, 36 כיוונים במקום שמונה, כך שאפשר לראות את הפער במערב כקטע רציף של כ-40°, ולא כגזרה אחת חסרת מזל.

פני השטח שמחוץ לטבעת אינם קובעים את גובה הבליטה: על פני 24 כיוונים אין קשר בין גובה הבליטה לבין עובי הקרום שמאחוריה (מתאם –0.04) או גובה פני השטח שם (–0.05). מתאם של +1 היה אומר שהבליטה גדלה בדיוק כשהקרום שמאחוריה גדל, ו-1– שהיא קטנה בדיוק; ערכים קרובים כל כך לאפס פירושו שהשניים אינם קשורים. בדרום, שם הקרום שמאחורי הטבעת הדק ביותר (≈30 ק"מ) ופני השטח נמוכים, הבליטה מן הגבוהות; במערב, שם הקרום עבה יותר (≈39–41 ק"מ), אין בליטה.

הפתחים בטבעת המערבית אינם הסיבה: פתחים 28 ו-29 (Tsiolkovskiy) מכסים כ-44% מן הטבעת המערבית, אבל כאשר מסירים אותם, עם הילה של 100 ק"מ, הבליטה אינה חוזרת (–3.5 ק"מ).

Cross-sections through SPA — yellow: crust; blue-grey: mantle; black line: surface; red line: base of the crust (numbers: crust thickness, km)



איור B.4.4. ארבעה חתכים דרך SPA: פני השטח (קו שחור), הקרום (צהוב), המעטפת (כחול-אפור) ובסיס הקרום (קו אדום). מחוץ לאגן פני השטח כמעט שטוחים בכל הכיוונים (0–5 ק"מ); ההבדל נמצא למטה — מתחת לטבעת בסיס הקרום שוקע ויוצר "שורש".

החתכים חותכים את האגן כפי שחותכים עוגה, כדי להראות את השכבות מן הצד. הקו העליון הוא הקרקע, הקו האדום הוא בסיס הקרום; הצהוב שביניהם הוא הקרום.

הבליטה היא שורש הנמשך כלפי מטה. בחתכים בסיס הקרום מתחת לטבעת שוקע לתוך המעטפת ואחר כך עולה שוב: בדרום 44 ק"מ בטבעת לעומת 29 ק"מ רחוק יותר, בצפון 54 לעומת 41, בצפון-מזרח 56 לעומת 48, במזרח 42 לעומת 35. במערב (37 לעומת 44) ובצפון-מערב (41 לעומת 44) אין שורש; בסיס הקרום מעמיק בהדרגה החוצה. קרום הצף על מעטפת צפופה ממנו נושא עובי עודף בעיקר למטה, כפי שקרחון נושא את רוב גופו מתחת למים; לכן הטבעת המעובה נראית למעלה כבליטה נמוכה של 1–2 ק"מ ולמטה כשורש הקרום של 15–17 ק"מ.

יש גם טבעת פנימית, 30°–43° מן המרכז, והשתיים משלימות זו את זו: היכן שהטבעת החיצונית חלשה — במערב, בצפון-מערב ובדרום-מערב — הפנימית חזקה ברובה. הטבעת הפנימית נדונה כאנומליה נפרדת (B5).

STEP 2 החידה

מדוע הקרום סביב האגן עבה מן הרגיל, ומדוע דווקא בחציו המזרחי, ודק בחציו המערבי?

STEP 3 מה המדע אומר

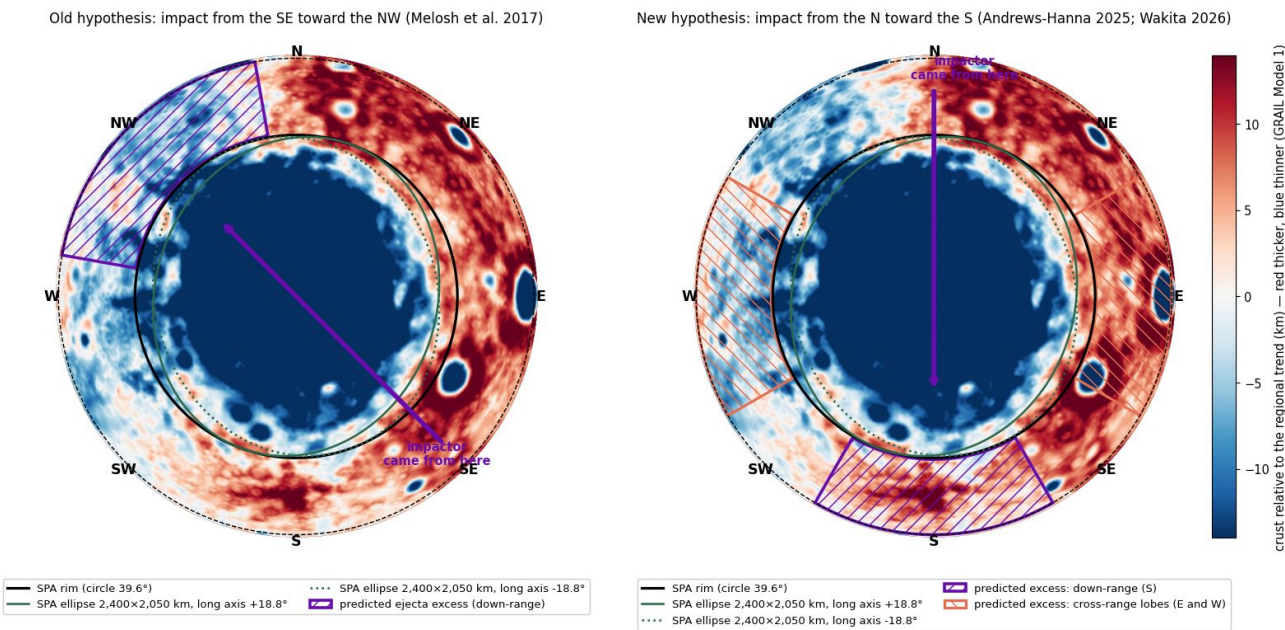
הטבעת היא שמיכת חומר הפליטה של הפגיעה: הקרום שנחפר הושלך החוצה ונערם סביב האגן. בפגיעה אלכסונית רוב החומר מושלך קדימה, בכיוון התנועה. בספרות יש שתי השערות לכיוון:

השערה	מקור	היכן צפוי עודף חומר
מדרום-מזרח לצפון-מערב (הישנה)	Melosh et al. 2017 (גוף של ≈ 200 ק"מ, ≈ 15 ק"מ/ש', 45°)	צפון-מערב (במורד המסלול); כמעט כלום מאחור
מצפון לדרום (החדשה)	Andrews-Hanna et al. 2025; Wakita et al. 2026	דרום (במורד המסלול), ושתי "כנפיים" לצדדים — מזרח ומערב — בדפוס של פרפר; ≈ 550 ק"מ במורד המסלול, ≈ 650 ק"מ לצדדים. Wakita et al. חומר מעטפת עד ≈ 400 ק"מ למערב, ושכבה דקה וקרובה יותר במזרח

טבלה: שתי ההשערות בספרות לכיוון הפגיעה, ומה כל אחת מהן צופה (B4).

"במורד המסלול" הוא הכיוון שאליו נע הגוף הפוגע. הטבלה מציינת, לכל השערה, היכן הסימולציות שלה עצמה מציבות את החומר שהושלך; אלה הניבויים שמולם מוצבת הטבעת שנמדדה בשלב 4.

B4 • The measured crust around SPA against what each impact direction predicts



איור B4.5. הקרום בתוך SPA ובטבעת (אדום: עבה; כחול: דק), עם שפת האגן (מעגל) והאליפסה בשני כיווני ההטיה. משמאל: ההשערה הישנה; החץ מראה מאין הגיע הגוף הפוגע, והשטח המקווקו היכן צפוי עודף. מימין: ההשערה החדשה; עודף צפוי בדרום (סגול) ובשתי כנפיים שוות, מזרח ומערב (כתום).

האיור מניח כל ניבוי על הקרום שנמדד. היכן ששטח מקווקו או צבוע נופל על אדום, הניבוי מתקיים; היכן שהוא נופל על כחול, אינו מתקיים.

STEP 4 היכן המדע אינו מספיק

ההשערה הישנה מנבאת את ההפך ממה שנמצא: היכן שצפוי עודף — בצפון-מערב — הקרום דק.

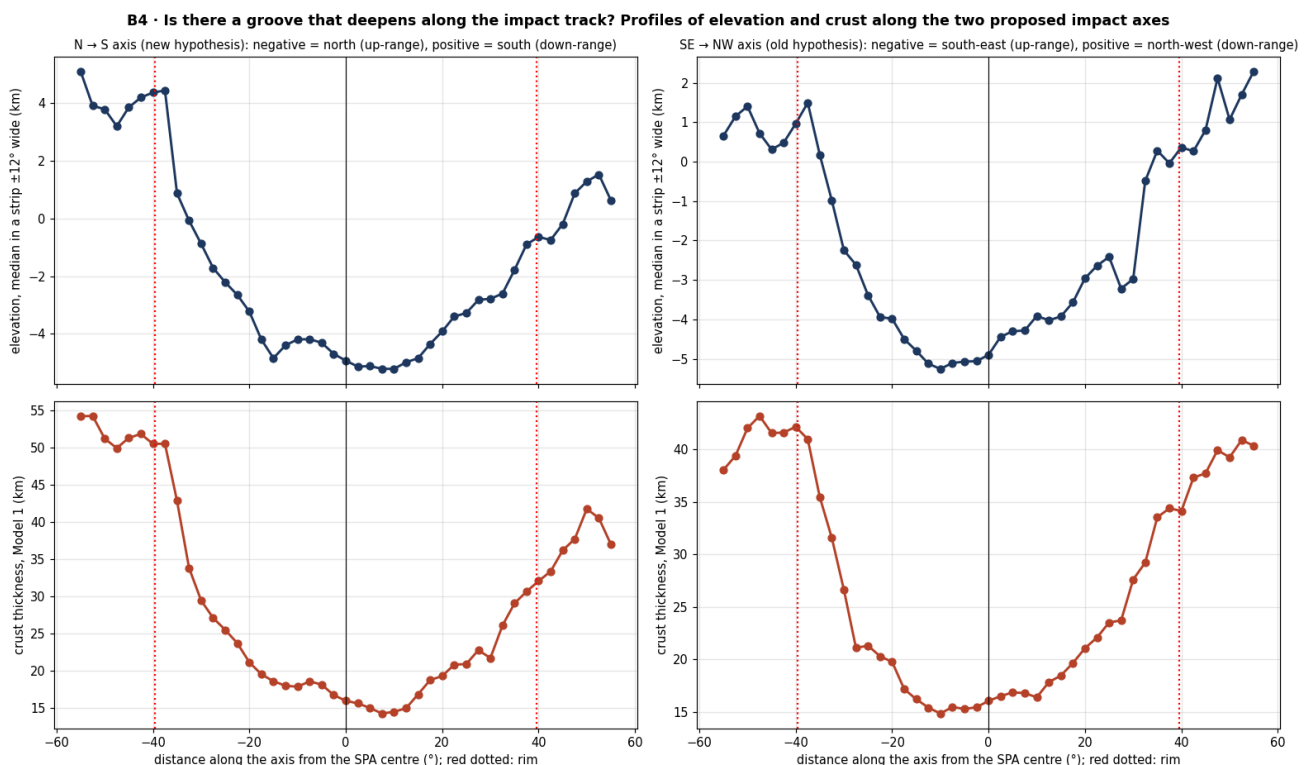
ההשערה החדשה מתאימה בחלקה: יש בליטה בדרום (+6.5 ק"מ), כצפוי, ובמזרח (+7.8), כצפוי — אבל במערב אין בליטה כלל (-2.3), בעוד ששתי הכנפיים אמורות להיות דומות, ובסימולציה של Wakita et al. יש במערב אף יותר חומר.

לא מצאנו ניבוי שפורסם של הדפוס "עבה במזרח, דק במערב"; זו מדידה חדשה.

כמות החומר: הטבעת עד 60° מחזיקה רק כ-37% מן הקרום החסר באגן. בסימולציות חלק גדול מחומר הפליטה עף רחוק או נמס; לכן זה אינו סותר את הפגיעה, אבל גם אינו תומך בה.

גם בקריאה המקובלת הפנים מפולס: פגיעה ענקית יוצרת התך גדולה, המתמיינת ומתפלסת לרצפה שטוחה, ולכן רצפה שטוחה וקרום פנימי אחיד מוסברים גם בה. מה שמבדיל בין ההסברים הוא משך הבישול: התך פגיעה מתקרר מהר יחסית (ראו B11, B15).

אין תעלה המעמיקה לאורך המסלול (איור B4.6): לאורך שני הצירים הרצפה רחבה ושטוחה, -4 עד -5 ק"מ על פני ~ 900 ק"מ. בזוויות שהוצעו עבור SPA ($30-45^\circ$) המדע אינו מנבא תעלה; תעלה נוצרת רק בפגיעה בזווית נמוכה מאוד, מתחת ל- 15° . נמצאה אסימטריה של השוליים לאורך ציר צפון-דרום: שפה צפונית גבוהה ותלולה ושפה דרומית נמוכה והדרגתית — הטיעון של ההשערה החדשה.



איור B4.6. גובה (למעלה) ועובי הקרום (למטה) לאורך שני צירי הפגיעה שהוצעו, ברצועה של $\pm 12^\circ$. אין תעלה מעמיקה; הרצפה רחבה ושטוחה. לאורך ציר צפון-דרום השפה הצפונית גבוהה ותלולה, הדרומית נמוכה והדרגתית.

האיור הוא בדיקה של קריאת הפגיעה לפי אמות המידה שלה: הוא מחפש לאורך כל מסלול מוצע תעלה, ומוצא במקומה רצפה שטוחה; והוא מראה את האסימטריה האחת שההשערה החדשה משתמשת בה לטובתה, הצפון

יש טבעת, וההתעבות בדרום ובמזרח מתאימה להשערה החדשה; הדקות במערב ואי-השוויון בין הכנפיים אינם מוסברים.

STEP 5 מה המודל אומר

ב-B3 הקרום החליק ונדחף מן הכיפה המחוממת. B4 שואל לאן הוא הלך, ומדוע הלך יותר לצדדים מסוימים מאשר לאחרים. התשובה נמצאת בקרום שהחום פגש סביב הכיפה.

החום בא מלמטה והיה החזק ביותר במרכז הכיפה התת-קרקעית. הוא התיך את האזור מכל צדדיו, אבל הקרום סביב הכיפה לא היה אחיד: עבה בצפון-מזרח, שם גובלות באגן הרמות של הצד הרחוק, ודק בדרום-מערב. בצפון-מזרח שוכן Apollo, הפתח הגדול ביותר ב-SPA, ים (פתח) שהיה קיים קודם והופעל מחדש בידי החום מלמטה.

הצד הצפון-מזרחי העבה הותך הרבה: כמות גדולה של קרום הוזזה שם, והיא השאירה טבעת בצפון-מזרח. הצד המערבי הותך מעט ונתן מעט חומר, ולכן לא נוצרה שם טבעת. בצפון-מזרח האזור המחומם צר והטבעות שוכנות קרוב לאגן; במערב ובדרום-מערב האזור המחומם רחב, והמרחק בין הטבעות גדול.

מדוע נותרה גבעה — קירור מבחון פנימה. במהלך החימום התרומם האזור לכיפה שטוחה. כאשר מקור החום נרגע, עם הרפיית הפחיסות לפני השחרור, החלה הכיפה לשקוע — אבל הקירור לא היה אחיד. החלק החיצוני, הטבעת, התקרר ראשון ו"קפא" במצב מורם, בתהליך ארוך; החלק המרכזי נשאר חם זמן רב יותר ושקע רק בסוף. כך נותרה גבעה בצורת טבעת סביב שקע, כמו עוגה ששוליה מתקשים ראשונים ועומדים גבוה בשפה בעוד מרכזה הרך שוקע בהתקררותו. מה שהתקרר ראשון גם עבר פחות דחיסה, ולכן הטבעת שמרה יותר מעוביה (השורש שנראה בחתכים, איור B4.4), ואילו המרכז, שנשאר חם, עבר דחיסה והתכווץ (B2). במערב הקרום הותך מעט ומעט חומר נערם; השוליים שקעו יחד עם המרכז, ולכן אין שם גבעה.

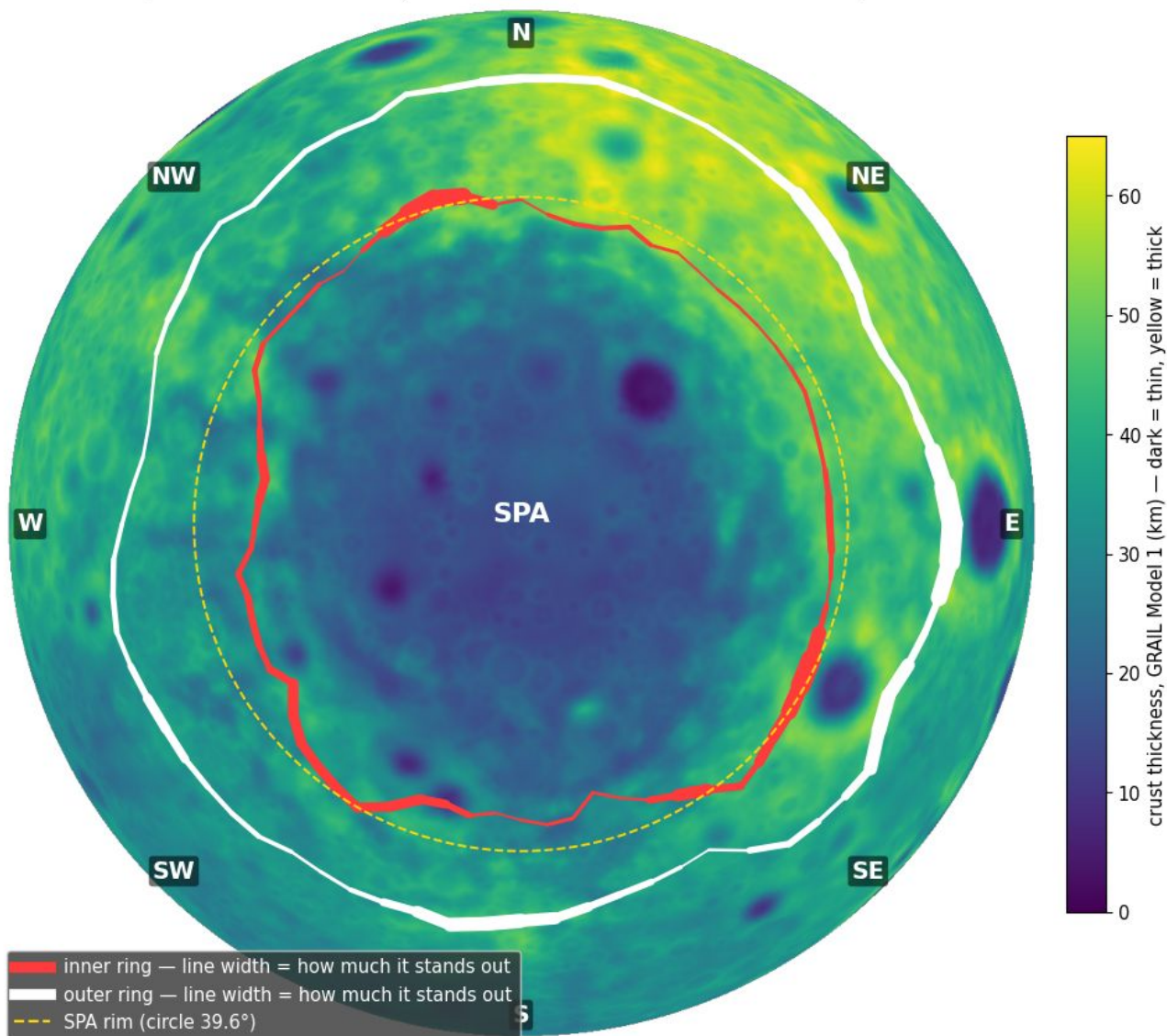
בליטה אינה ברירת המחדל. אזור שחומם, התקרר ושקע נותן מעבר חלק אל פני השטח המקוריים — "קו אפס" — בלי גבעה ביניהם. זה המצב במערב. הבליטה בכיוונים האחרים היא תוספת: הקרום שנדחף והחליק מן המרכז ונערם בשוליים.

בתוך האגן החום פילס הכול, כמו מאגר מים, לרמה אחידה. מחוצה לו נשמרו פני השטח המקוריים — עבים בצפון-מזרח, דקים בדרום-מערב. הקרום שנדחף החוצה מן המרכז והחליק מן הכיפה (B3) נערם בשוליים — בטבעת החיצונית או, קרוב יותר, בטבעת הפנימית (B5). בקירור שבא אחר כך הכול שקע: השכבות עברו דחיסה והתכווצו ביחס לעוביין.

המודל מנבא את החום החזק ביותר במרכז הכיפה; טבעת היכן שהקרום הצפון-מזרחי העבה הותך הרבה, ואין טבעת במערב, שם הקרום הותך מעט; אזור מחומם צר מול הצד העבה; הקרום הדק ביותר בצד הדק; קרום אחיד בתוך האגן; פני השטח המקוריים מחוצה לו; וחומר שנערם בשוליים.

STEP 6 כיצד זה מתאים למודל

The basin and its two rings of thickened crust
(each ring drawn where the crust peaks; the thicker the line, the more the ring stands out)



איור B4.7. האגן ושתי טבעות הקרום המעובה שלו: אדום — הטבעת הפנימית (B5); לבן — הטבעת החיצונית. ככל שהקו עבה יותר, הטבעת בולטת יותר. קו צהוב מקווקו: השפה כמעגל (39.6°).

האיור משרטט את שתי הטבעות על מפה אחת. היכן שהקו הלבן עבה הטבעת החיצונית חזקה; היכן שהוא מצטמצם, במערב, הטבעת הפנימית האדומה היא החזקה, והפער בין השתיים רחב.

הטבלה שלהלן מציבה כל ניבוי של שלב 5 לצד המדידה שבודקת אותו. העמודה השמאלית (הראשונה) היא מה שהמודל דורש; העמודה הימנית (השנייה) היא מה שנמצא, עם הסעיף שבו נמדד.

מה המודל מנבא	מה נמצא
החום החזק ביותר במרכז הכיפה	מינימום המכתשים נמצא בתוך 6° ממרכז הכיפה (C.3); Chang'e-6, שדגימותיה מראות חימום ממושך (B11, B12), (B15), נחתה 11.6° ממנו, בתוך Apollo
טבעת היכן שהקרום העבה הותך הרבה, ואין טבעת היכן שהותך מעט	הטבעת עבה למזרח: רכיב חד-צדדי של 9.1–7.7 ק"מ לכיוון 99°–96° (מחקר 3); אין בליטה במערב

האזור מחומם צר מול הצד העבה	האזור הדק הצר ביותר בצפון-מזרח: הקרום עובר את 30 ק"מ כבר ב-24°, לעומת 29°–37° בכיוונים האחרים (מודל 1; גרסה קודמת נתנה 29°–33°; במודל 4 המזרח, 23°, צר באותה מידה) (B3)
הקרום הדק ביותר בצד הדק	מרכז הקרום הדק של SPA עצמו נמצא 150–190 ק"מ דרום-דרום-מערב למרכז; הקרקע הנמוכה ביותר והמסה הצפופה שוכנות בדרום (B2, B3)
מרחק גדול בין הטבעות בצד המערבי הדק	מערב ודרום-מערב: 20°–24°; דרום: 9°–17°
קרום אחיד בפנים	עד 20° מן המרכז כל שמונת הכיוונים מתכנסים ל-15–19 ק"מ; מחוץ לאגן 28–56 ק"מ (איור B4.2)
פני השטח המקוריים בחוץ	בצפון-מזרח עבים ונשארים עבים; בדרום-מערב דקים ונשארים דקים
גבעה שנותרה היכן שהשוליים התקררו ראשונים	גבעה של +1 עד +2 ק"מ ושורש הקרום בצדדים שבהם הותך ונערם הרבה קרום; במערב, שם הקרום הותך מעט, אין גבעה (0.5– ק"מ) ואין שורש
חומר שנערם בשוליים	הטבעת החיצונית בולטת בשבעה משמונה כיוונים (3.9–4.4 ק"מ בממוצע); במערב החומר נערם קרוב יותר, בטבעת הפנימית

טבלה: ניבויי המודל מול הממצאים (B4).

החלוקה שנותרה פתוחה ב-B3 — רשומת מכתשים חלשה בצפון, קרום דק בדרום — מתיישבת עכשיו בלי מקור נפרד: החום עלה מתחת למרכז הכיפה ופעל על קרום שהיה עבה בצפון-מזרח ודק בדרום-מערב; הצפון שומר את רשומת המכתשים שנמחקו (B1), הדרום את הקרום הדק ביותר, את הקרקע הנמוכה ביותר ואת המסה הצפופה.

הכרעת המודל: מתאים

כל ניבוי של המודל — החום החזק ביותר במרכז הכיפה, הטבעת היכן שהקרום העבה הותך הרבה והיעדרה במערב, האזור המחומם הצר מול הצד העבה, הפנים האחיד, פני השטח החיצוניים שנשמרו, הגבעה והשורש היכן שהשוליים התקררו ראשונים, והחומר שנערם בשוליים — נמצא במדידות.

נתונים וקוד.

נתונים	מקור
עובי הקרום	GRAIL, ארבעת המודלים של Wieczorek et al. 2013; קו בסיס: פולינום Legendre ממעלה 4 במרחק מן הנקודה התת-ארצית (בדיקה בלתי תלויה, SPA8_GRAIL)
גובה	LOLA LDEM_4
אליפסה	Garrick-Bethell & Zuber 2009 — 2400×2050 ק"מ; שני כיווני הטיה, $\pm 18.8^\circ$

Melosh et al. 2017; Andrews-Hanna et al. 2025; Wakita et al. 2026 — באמצעות סקירת ספרות (30.9.2026)	ספרות על כיוון הפגיעה
b4.py, b4full.py, b4groove.py; פרופילים לפי גזרה והשוואה מקומית (30.9.2026)	קוד

טבלה: נתונים וקוד של B4.

קו הבסיס הוא המגמה האזורית שהוסרה בשלב 1: עקומה חלקה של עובי הקרום כפונקציה של המרחק מן הנקודה התת-ארצית (הנקודה על הירח הפונה אל כדור הארץ), הנושאת את המעבר מן הצד הקרוב הדק אל הצד הרחוק העבה ושום דבר קטן מזה.

פתוח. הקשר לטבעת הפנימית מוצג ב-B5. הקשר להתעגלות (מתאם $+0.58$ עד $+0.62$; 5.7% ממערכות צירים אקראיות מגיעות אליו) ממתין למבחן בלוקים. ההתעגלות היא השינוי של הירח הצעיר מצורה פחוסה לכדור (מאמר 7), שדחס את פני השטח בכיוונים מסוימים ומתח אותם באחרים; הטבעת עבה יותר במקום שבו העיוות הזה דחס. מערכת צירים אקראית מגיעה לאותו מתאם ב- 5.7% מן הניסיונות, וזה מרמז אך עדיין אינו מכריע; מבחן בלוקים, השומר כיוונים שכנים יחד בעת הערבוב, יגיד אם הקשר מחזיק. האגנים והמכתשים הצעירים בטבעת (הכתמים הכחולים) יוסרו, כדי לבדוק שהאסימטריה נשארת.

3 THE RESEARCH • STUDY 3 המחקר • מחקר

STEP 1 הגדרת שאלת המחקר והבעיה

התופעה. הקרום סביב SPA עבה מן הקרום האזורי. **הפער בידע.** האם ההתעבות היא טבעת העומדת מעל פני השטח שסביבה בכל כיוון, או שיפוע של הצד הרחוק שהאגן חוצה במקרה, ובאיזה כיוון היא אינה אחידה — לא נמדד כיוון אחר כיוון. **שאלת המחקר:** היכן סביב SPA הקרום מעובה, בכמה מעל הקרום הרחוק יותר באותו כיוון, ובאיזה כיוון הטבעת עבה ובאיזה דקה?

STEP 2 סקירת ספרות (רקע מדעי)

הטבעת נקראת כשמיכת חומר הפליטה של פגיעה אלכסונית, העבה ביותר במורד המסלול: לצפון-מערב בפגיעה מדרום-מזרח (Melosh et al. 2017), לדרום עם שתי כנפיים שוות למזרח ולמערב בפגיעה מצפון (Andrews-Hanna et al. 2025; Wakita et al. 2026). **מה חדש כאן:** הטבעת נמדדת מול הקרום הרחוק יותר באותו כיוון, כך ששיפוע הצד הרחוק מוסר, ב-8, 24 ו-36 כיוונים, על המעגל ועל האליפסה, בקרום ובגובה.

STEP 3 ניסוח השערת המחקר

הקרום שהחליק מן הכיפה נערם בשוליה במקום שבו הקרום העבה הותך הרבה, ולא במקום שבו הקרום הותך מעט; לכן טבעת עומדת מעל הקרום הרחוק יותר ברוב הכיוונים, עבה בצד של הקרום העבה של הצד הרחוק וחסרה בצד המערבי הדק.

STEP 4 מערך המחקר (מתודולוגיה)

סוג המחקר: כמותי; קרום וגובה לפי כיוון וטבעת. **המדגם:** ארבעת מודלי הקרום של GRAIL, לאחר הסרת המגמה האזורית (מעלה 4); הטבעת 45° – 60° מול 70° – 90° באותו כיוון; גובה LOLA. **הכלים:** קוד המפרק את הטבעת לרכיב חד-צדדי ולרכיב דו-צדדי על המעגל ועל שתי האליפסות, ומשרטט את פרופיל בסיס הקרום בחתכים.

STEP 5 איסוף הנתונים (ביצוע המחקר)

הטבעת נקראה בכל כיוון בכל ארבעת המודלים; הפתחים בטבעת המערבית הוסרו עם הילה של 100 ק"מ כבדיקה. הערכים הם הטבלאות ואיורים B4.1–B4.6.

STEP 6 ניתוח הנתונים ועיבודם

הטבעת. התעבות של 3.8–5.7 ק"מ ב-50°–55°, העומדת מעל הקרום הרחוק יותר בשבעה משמונה כיוונים, 3.9–4.4 ק"מ בממוצע; שורש הקרום מתחתיה בדרום, בצפון, בצפון-מזרח ובמזרח. הכיוון. הרכיב החד-צדדי הוא 7.7–9.1 ק"מ לכיוון 96°–99°, כמעט זהה על המעגל (7.8–8.9 ק"מ) ועל שתי האליפסות; הבליטה עצמה אינה אחידה ב-3.7–4.4 ק"מ, עדיין לכיוון מזרח. המערב. אין בליטה (2.3– ק"מ; 0.5– ק"מ בגובה), והיא אינה חוזרת כאשר מסירים את הפתחים. פני השטח שמאחור. גובה הבליטה אינו קשור לקרום או לגובה שמאחוריה (0.04–, 0.05–).

STEP 7 הסקת מסקנות וכתובת הדוח

תוצאה. ההשערה נתמכת: טבעת עומדת מעל פני השטח שסביבה בשבעה משמונה כיוונים, עבה במזרח וחסרה במערב, אסימטריה של מזרח–מערב שאף אחד משני כיווני הפגיעה אינו מנבא. **מגבלות.** קו הבסיס של המגמה האזורית הוא בחירה; הטבעת מחזיקה רק כ-37% מן הקרום החסר באגן; אגנים ומכתשים צעירים בתוך הטבעת עדיין טעונים הסרה. **כיווני מחקר נוספים.** הטבעת לאחר הסרת האגנים הצעירים; הקשר שלה לעיוות של ההתעגלות במבחן בלוקים (מאמר 7).

B5 הטבעת הפנימית

בקצרה. מלבד הטבעת החיצונית (B4), SPA מוקף בטבעת שנייה של קרום מעובה, קרובה לאגן — 28°–44° ממרכז — והיא הברורה והמוגדרת יותר מבין השתיים. היא אינה מעגל: היא רחוקה יותר בצפון-מזרח ובמזרח, וקרובה יותר בדרום-מערב ובמערב; מרכזה נמצא כ-110–120 ק"מ מזרח-צפון-מזרח למרכז SPA. הדופן הפנימית תלולה ביותר בצפון ובצפון-מזרח, ומתונה ביותר בדרום ובדרום-מערב.

סעיף זה שואל על הטבעת שלוש שאלות: האם היא אכן קיימת לכל אורך ההיקף, היכן מרכזה, ובאיזה צד הדופן שלה תלולה. לתשובות יש משקל, משום שצורת השפה של אגן משמרת את התהליך שיצר אותו. פגיעה משאירה דפוס הקשור לכיוון התעופה; כיפה שעלתה תחת החום והתפשטה אל מול הקרום שסביבה משאירה דפוס הקשור לאותו קרום. הסעיף מסביר גם כיצד המעבר של הירח הצעיר מן הצורה הפחוסה לכדור שינה את המרחקים על פני השטח שלו, ואיתם את המרחקים שאנו מודדים היום בין SPA לבין הנקודות שהזינו אותו.

STEP 1 החריגה

האגן ושתי טבעות הקרום המעובה שלו מוצגים באיור B4.7. טבעת של קרום מעובה היא חגורה סביב האגן שבה הקרום — השכבה החיצונית הקלה של הירח, הצפה על המעטפת הצפופה יותר שמתחתיה — עבה יותר מאשר משני צדיה. GRAIL, זוג החלליות שמיפה את שדה הכבידה של הירח, נותן את עובי השכבה הזאת בכל מקום: היכן שהקרום עבה, חומר קל תופס את מקומה של מעטפת צפופה, ומשיכת הכבידה חלשה מעט. באיור B4.7 הטבעת הפנימית היא הקו האדום, והטבעת החיצונית של B4 היא הקו הלבן; המעגל הצהוב המקווקו הוא השפה כמעגל ב-39.6° מן המרכז. מעלת קשת אחת על הירח היא כ-30.3 ק"מ של פני שטח, ולכן 39.6° הן כ-1,200 ק"מ.

כיצד מדדנו. בכל אחד מ-24 כיוונים (כל 15°) חיפשנו את שיא עובי הקרום בין 28° ל-44° מן המרכז, ואת המידה שבה הוא מתנשא מעל שכניו. הגודל השני הוא הבולטות (prominence): כמו גובהה של גבעה מעל האוכפים שמשני צדיה, הוא אומר עד כמה השיא בולט, ולא כמה עבה הקרום במונחים מוחלטים. טבעת אמיתית צריכה להראות שיא בעל בולטות ברורה ברוב הכיוונים; טבעת שהיא רק רעש הייתה נותנת שיאים בעלי בולטות קטנה,

מפוזרים במרחקם. הממצאים זהים במודלים 1 ו-4 — שניים ממודלי הקרום של GRAIL שפורסמו (Wieczorek et al. 2013), שנבנו בהנחות שונות — ולכן אינם תלויים בבחירת המודל.

הטבלה מפרטת, לכל כיוון, את מרחק השיא מן המרכז, את הבולטות שלו, את עובי הקרום בשיא, ולשם השוואה את עובי הקרום ברצפה האגן באותו כיוון. הכיוונים נמדדים מן הצפון (0°) עם כיוון השעון, דרך המזרח (90°), הדרום (180°) והמערב (270°).

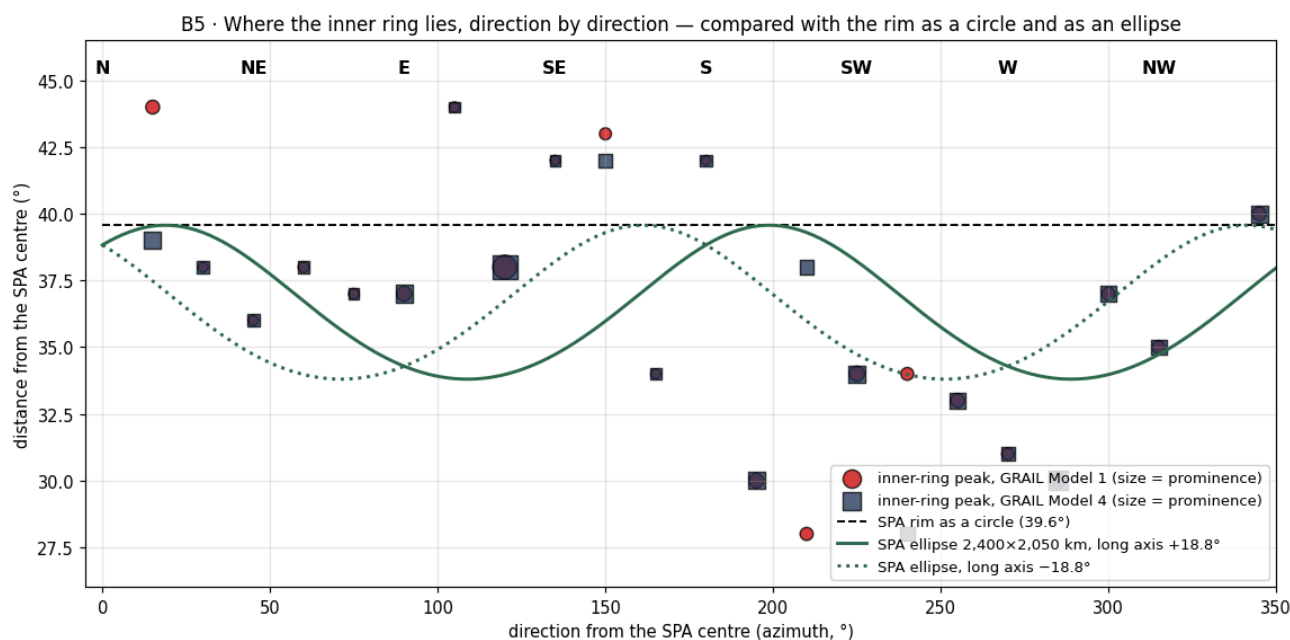
כיוון	מרחק השיא		בולטות		הקרום בשיא	קרום הרצפה
	מודל 1	מודל 4	מודל 1	מודל 4	מודל 4 / 1	מודל 4 / 1
0° צפון	—	—	—	0.0	0.0	—
15°	44°	39°	6.2	10.5	57 / 71	19 / 26
30°	38°	38°	2.3	5.2	54 / 68	19 / 27
45° צפון-מזרח	36°	36°	2.6	4.4	52 / 66	18 / 25
60°	38°	38°	3.1	4.1	50 / 61	17 / 24
75°	37°	37°	2.8	2.8	49 / 60	18 / 25
90° מזרח	37°	37°	8.1	11.3	48 / 59	17 / 25
105°	44°	44°	2.5	3.2	47 / 59	16 / 23
120°	38°	38°	23.9	30.3	47 / 59	15 / 22
135° דרום-מזרח	42°	42°	2.2	2.6	45 / 55	15 / 22
150°	43°	42°	4.1	6.2	40 / 51	15 / 21
165°	34°	34°	2.1	3.4	31 / 40	15 / 21
180° דרום	42°	42°	1.9	3.8	36 / 46	15 / 21
195°	30°	30°	7.6	10.7	29 / 38	15 / 21
210°	28°	38°	5.3	7.3	26 / 48	14 / 20
225° דרום-מערב	34°	34°	8.3	11.0	38 / 49	14 / 21
240°	34°	28°	5.1	6.7	35 / 39	15 / 22
255°	33°	33°	6.7	9.2	34 / 44	15 / 22
270° מערב	31°	31°	4.5	6.4	35 / 45	16 / 22
285°	30°	30°	9.5	13.9	40 / 52	16 / 22
300°	37°	37°	5.8	9.6	45 / 58	15 / 22
315° צפון-מערב	35°	35°	5.5	8.2	34 / 44	18 / 26
330°	—	—	—	0.0	0.0	18 / 25
345°	40°	40°	6.8	10.2	49 / 62	17 / 24

הבולטות והקרום בק"מ; קרום הרצפה: ממוצע עד 15° מן המרכז. מרחק: כחלחל — רחוק מן המרכז; כתום — קרוב. בולטות: ככל שהתא אדום יותר, הטבעת בולטת יותר. "—": אין שיא בטווח.

כיצד לקרוא את הטבלה: עקבו אחר עמודות המרחק מלמעלה למטה, והצבע עובר מכחול (רחוק) במחצית הראשונה של המעגל, בצפון-מזרח, במזרח ובדרום-מזרח, לכתום (קרוב) במחצית השנייה, בדרום-מערב, במערב ובצפון-מערב. הטבעת יושבת אפוא כולה מחוץ למרכז האגן, ואינה משוננת. בעמודות הבולטות התאים האדומים החזקים מסמנים היכן הטבעת בולטת ביותר. שתי העמודות האחרונות מראות עד כמה הטבעת גדולה ביחס לרצפה האגן: הקרום בשיא הוא 26–57 ק"מ במודל 1 ו-38–71 ק"מ במודל 4, לעומת 14–19 ו-20–27 ק"מ ברצפה, כך שהטבעת עבה פי שניים עד שלושה מן הרצפה שלצידה. מודל 4 נותן באופן שיטתי קרום עבה יותר ממודל 1, אך דפוס המרחקים והבולטויות זהה בשניהם.

הטבעת קיימת כמעט לכל אורך ההיקף: ב-22 מתוך 24 כיוונים (היא חסרה בצפון, 0°, ובצפון-צפון-מערב, 330°). היא החזקה ביותר בדרום-מזרח, ב-120° (24+ עד 30+ ק"מ), בצפון-מערב, ב-285° (10+ עד 14+), במזרח, ב-90° (8+ עד 11+), ובדרום-מערב, ב-195°–225° (8+ עד 11+).

מרחקה משתנה: בצפון-מזרח ובמזרח 36°–44°; בדרום-מערב ובמערב 28°–34°, כלומר בתוך מעגל השפה.



איור B5.1. היכן שוכנת הטבעת הפנימית, כיוון אחר כיוון (עיגולים: מודל 1; ריבועים: מודל 4; גודל הסמל: הבולטות), מול השפה כמעגל (מקווקו) וכאליפסה בשני כיווני ההטיה (ירוק).

איור B5.1 משרטט את אותם שיאים על מפה הנראית ממעל לאגן. על מה להסתכל: הסמלים אינם עוקבים אחר המעגל המקווקו של השפה, וגם לא אחר האליפסות הירוקות. הם נמצאים מחוץ למעגל בצפון-מזרח ובמזרח ובתוכו בדרום-מערב ובמערב, כך שיחד הם משרטטים מעגל משלהם, שמרכזו נדחק אל מזרח-צפון-מזרח.

כדי לתת לרושם הזה מספרים, התאמנו טבעת ל-22 השיאים: מעגל שמרכזו ורדיוסו חופשיים, שמותר לו גם להיות מוארך מעט. ההתאמה נותנת את צורת הטבעת הפנימית (התאמה לפי כיוון):

מדד	מודל 1	מודל 4
רדיוס ממוצע	36.8° (כ-1,116 ק"מ)	36.6° (כ-1,111 ק"מ)
מיקום מרכז הטבעת ביחס למרכז SPA (מזרח-צפון-מזרח)	118° ק"מ לכיוון 68°	108° ק"מ לכיוון 82°

מרכז הטבעת	כ-51.4° דרום, 196.8° מזרח	כ-52.4° דרום, 196.8° מזרח
הארכה	2.6° לאורך הציר 332°/152° (צפון-צפון-מערב – דרום-דרום-מזרח)	2.5° לאורך הציר 335°/155°

הטבלה אומרת שלושה דברים. לטבעת רדיוס של כ-37°, מעט בתוך מעגל השפה (39.6°). מרכזה נמצא כ-110–120 ק"מ ממרכז SPA, לכיוון מזרח-צפון-מזרח, בשני המודלים. והיא כמעט מעגל: ההבדל בין הכיוון הארוך שלה לקצר הוא רק 2.5–2.6°, כ-80 ק"מ בטבעת שקוטרה יותר מ-2,200 ק"מ. מרכז הטבעת אינו במרכז האגן, אך הטבעת עצמה אינה מתוחה.

הטבעת הפנימית אינה האליפסה המקובלת. האליפסה (2,050×2,400 ק"מ) מנבאת טבעת קרובה במזרח ובמערב ורחוקה בצפון ובדרום; הטבעת בפועל רחוקה בצפון-מזרח ובמזרח וקרובה בדרום-מערב ובמערב — כמו מעגל שמרכזו נמצא מזרח-צפון-מזרח למרכז SPA.

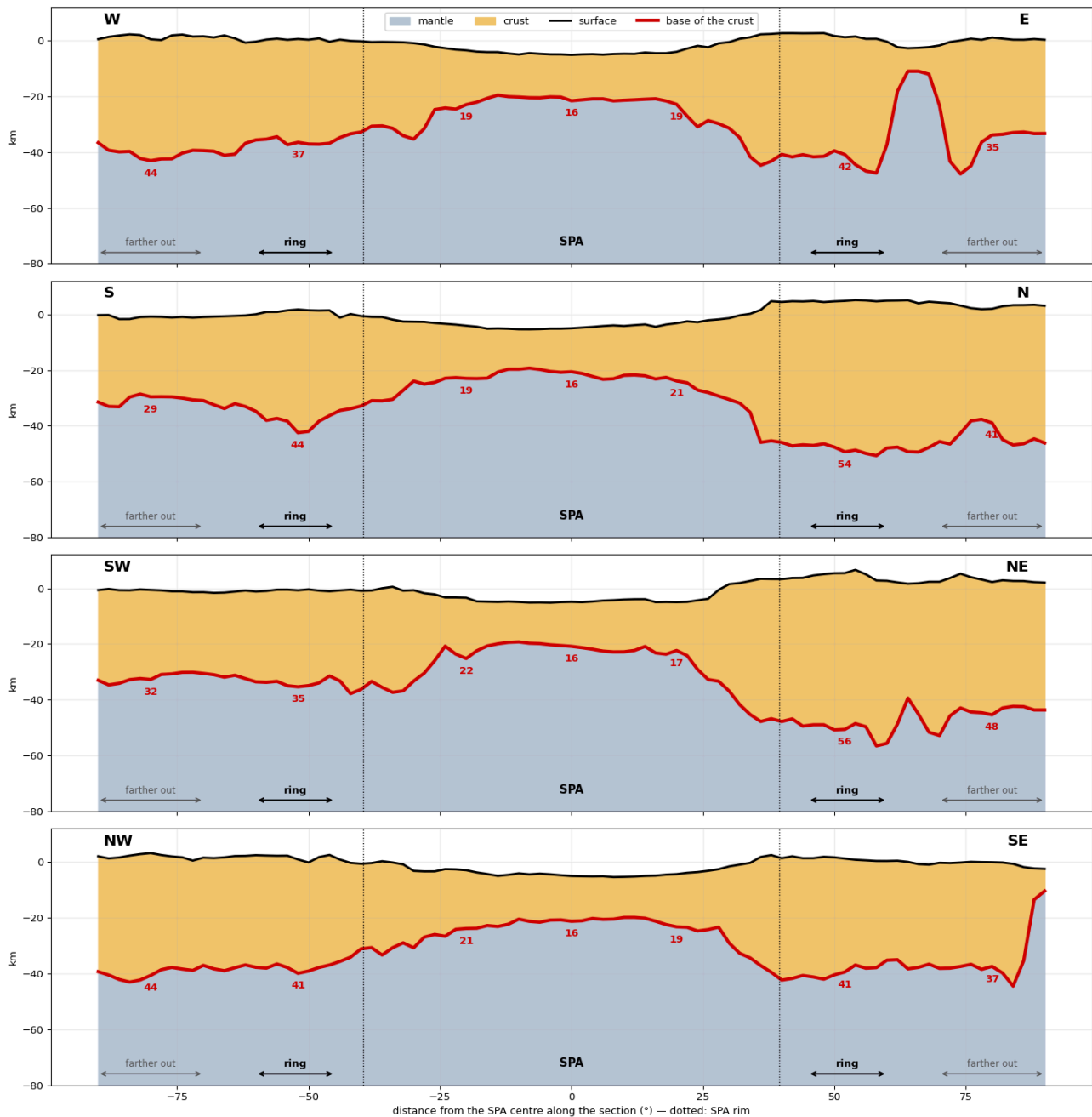
הדופן הפנימית — המדרון התלול ביותר בין רצפה האגן לטבעת (הציפייה: תלולה בצד המתנגד, מתונה בצד המתנגד פחות). ב"צד המתנגד" הכוונה לצד שבו הקרום שמסביב עבה וקר ועצר את החומר שנע החוצה מן האגן; שם הקרקע מטפסת בבת אחת מן הרצפה אל הטבעת. היכן שהקרום התנגד פחות, החומר התפשט רחוק יותר והטיפוס הדרגתי. הדופן נמדדת בשתי דרכים בלתי תלויות: בעובי הקרום מ-GRAIL (בכמה קילומטרים הקרום מתעבה לכל 100 ק"מ של מרחק) ובגובה פני השטח ממד הגובה הלייזרי LOLA (בכמה מטרים הקרקע עולה לכל קילומטר):

כיוון	בעובי הקרום (ק"מ ל-100 ק"מ)	בגובה (מ' לק"מ)
צפון	10.5	25.3
צפון-מזרח	9.3	30.7
מזרח	8.0	17.8
דרום-מזרח	6.3	18.5
דרום	4.9	14.9
דרום-מערב	6.6	11.5
מערב	7.3	16.0
צפון-מערב	4.4	20.8

ככל שהתא אדום יותר, הדופן תלולה יותר. התלולה ביותר: צפון וצפון-מזרח; המתונה ביותר: דרום ודרום-מערב.

קראו את שתי העמודות יחד. בקרום, הצפון תלול ביותר (10.5) והצפון-מזרח אחריו (9.3); בגובה, הצפון-מזרח תלול ביותר (30.7 מ' לק"מ, עלייה של כ-3 ק"מ לאורך 100 ק"מ) והצפון אחריו (25.3). בשתייהן הדרום והדרום-מערב הם מן המתונים ביותר. שני המדדים באים ממכשירים שונים, והם מסכימים על הצד שבו הדופן תלולה: הצפון והצפון-מזרח, שם רמות הצד הרחוק — הקרום העבה ביותר על הירח — גובלות באגן (B4).

Cross-sections through SPA — yellow: crust; blue-grey: mantle; black line: surface; red line: base of the crust (numbers: crust thickness, km)



איור B5.2. ארבעה חתכים דרך SPA (אותם חתכים כמו ב-B4): הקרום (צהוב), המעטפת (כחול-אפור), פני השטח (קו שחור) ובסיס הקרום (קו אדום). הטבעת הפנימית היא העלייה החדה של בסיס הקרום קרוב לשפה (קו מנוקד); בצפון ובצפון-מזרח היא תלולה, בדרום-מערב מתונה.

איור B5.2 מראה את הטבעת בחתך, כאילו הירח נחתך דרך האגן. השכבה הצהובה דקה מתחת לרצפה ומתעבה בבת אחת ליד השפה המנוקדת; ההתעבות החדה הזאת היא הטבעת הפנימית. השוואת שני הקצוות של חתך העובר מצפון-מזרח לדרום-מערב מראה ישירות את חוסר הסימטריה של הדופן: עלייה דמוית מצוק בקצה אחד, ומדרון ארוך בקצה האחר.

STEP 2 החידה

מדוע יש שתי טבעות של קרום מעובה, מדוע הפנימית אינה עגולה ומרכזת נמצא מזרח-צפון-מזרח למרכז האגן, ומדוע הדופן שלה תלולה בצפון-מזרח ומתונה בדרום-מערב?

STEP 3 מה המדע אומר

באגני פגיעה גדולים השפה מורמת, וסביבה נערם צווארון של קרום מעובה (crustal collar): חומר שנזרק ונדחק החוצה מן החלל נח ממש מעבר לשולו. במודלים תלת-ממדיים של SPA הצווארון מופיע, ואף גדול מן הנמדד (Citron et al. 2024). בפגיעה הנעה מצפון לדרום, הצד שאליו נעה (הדרום) מתון והדרגתי, והצד שממנו באה (הצפון) תלול (Andrews-Hanna et al. 2025). בקריאה זו, חוסר הסימטריה של הדופן הוא תיעוד של כיוון התעופה של הגוף הפוגע.

STEP 4 היכן המדע אינו מספיק

הדופן תלולה בצפון ומתונה בדרום, וזה מתאים לפגיעה מצפון לדרום. אבל הדופן התלולה ביותר נמצאת בצפון-מזרח (30.7 מ' לק"מ) והמתונה ביותר בדרום-מערב (11.5) — ציר צפון-מזרח/דרום-מערב, ולא ציר צפון/דרום. מרכז הטבעת הפנימית נמצא כ-110–120 ק"מ מזרח-צפון-מזרח למרכז SPA, בערך בניצב לציר הפגיעה המוצע. פגיעה אלכסונית מסיטה את המבנה לאורך כיוון התעופה שלה, ולא לרוחבו. הצווארון במודלים גדול מן הנמדד (Citron et al. 2024); כאן יש שתי טבעות, והפנימית חזקה בדרום-מזרח (+24 עד +30 ק"מ).

הכרעת המדע: מסביר בחלקו

במודלים של פגיעה נוצר סביב האגן צווארון מורם של קרום, אך ההסבר לצורתו נבנה לאחר המדידה: כיוון הפגיעה נבחר כך שיתאים לשפה הצפונית התלולה. הוא אינו מנבא לא טבעת פנימית שמרכזה מזרח-צפון-מזרח למרכז האגן, ולא ציר צפון-מזרח/דרום-מערב לדופן.

STEP 5 מה המודל אומר

במודל SPA לא נחפר; הוא הורם ואחר כך שקע. חום מן הברורים, Serenitatis-Imbrium, שיצא בצד הרחוק והצטבר מתחת לאזור, דחף אותו מעלה לכיפה, הקרום שהתרכך שלה החליק החוצה אל הצדדים, וכשהחום שכך הכיפה התקררה ושקעה לאגן שאנו רואים (A.5). הטבעות הן המקומות שבהם החומר שהחליק החוצה נעצר אל מול הקרום שסביבו.

הטבעת הפנימית היא שולי הכיפה שעלתה. יש טבעת פנימית אחת וטבעת חיצונית אחת — לא שני גלים ולא שני אירועים — ושתייהן מעוצבות בידי עובי הקרום שמסביב: עבה בצפון-מזרח (רמות הצד הרחוק), דק בדרום-מערב; הצד הצפון-מזרחי תלול בשתייהן. קרום עבה וקר הוא קיר יציב: חומר הנלחץ אליו נערם קרוב ותלול, כמו שלג שמחרשה דוחפת אל שפת מדרכה. קרום דק נכנע, והחומר מתפשט רחוק יותר ובמתינות.

ההתעגלות משנה מרחקים על פני השטח; היא אינה מזיזה דבר על פניו. החום עלה לאורך ציר ישר. אחר כך הירח התעגל — אותו מנגנון שיצר את העודף בקטבים (מאמר 7) — והמרחקים על פני השטח השתנו. לפני ההתעגלות הצד הרחוק היה הקצה המחודד של גוף מוארך (1 : 0.637 : 0.601); בהתעגלות, מה שהיה קרוב לקצה הזה נעשה רחוק ממנו יותר, והאגן נמתח בכיוון זה.

מדוע המרחקים ליד הקצה גדלים אפשר לראות בבלון מוארך, כמו כדור רוגבי, שצוירו עליו נקודות ליד אחד מקצותיו. כשמביטים ממרכז הבלון, הנקודות שעל המדרון הארוך והמתעקל בעדינות לעבר הקצה נמצאות כולן בתוך חרוט צר של כיוונים. לחצו את הבלון לכדור עגול: הקצה נמשך פנימה והגוף נעשה עגול, ואותן נקודות — עדיין על אותו כתם של עור, ואף אחת מהן לא החליקה — נמצאות עכשיו בתוך חרוט רחב יותר. המרחקים

הזוויתיים שלהן מן הקצה גדלו. עבור הצורה 1 : 0.637 : 0.601 הגידול ליד הקצה הוא היחס בין הציר הארוך לשני הקצרים, $1.57 \approx 1/0.637$ ו- $1.66 \approx 1/0.601$.

ליד הקצה המרחקים גדלו בגורם מקומי של 1.57–1.66; גורם זה תקף לזוויות קטנות ליד הקצה, ואינו מכפיל קבוע לכל הזוויות — בזוויות גדולות משתמשים במיפוי המלא של ההתעגלות. בזוויות החשובות ל-SPA המיפוי המלא נותן גידול קטן יותר, כ-1.4–1.5: המרחקים מן הכיפה אל היציאות גדלים מ- 17.0° ו- 21.2° על הצורה הפחוסה ל- 24.1° ו- 29.2° על הכדור (ראו נקודות ייחוס להלן), ומרחקו של SPA מן הקצה הרחוק — הנקודה שמול מרכז המגע — גדל מכ- 27° ל- 39.5° .

ההתעגלות אינה סיבוב קשיח: סיבוב מסובב את כל פני השטח יחד ושומר כל מרחק בין שתי נקודות; ההתעגלות משנה את המרחקים בין נקודות על פני השטח. לכן SPA לא נע על פני השטח; המעבר מן הצורה הפחוסה לכדור שינה את הצירים ואת המרחקים, ומיקום מרכז הטבעת הוא מראה שנוצר מן השינוי הזה בצורה. בקצרה: כ- 27° מן הקצה הרחוק בזמן הברנר, על הצורה הפחוסה; כ- 39.5° על הכדור של היום (A.5). שני המספרים מתארים את אותו מקום על שתי צורות של הגוף.

תזמון. ההתעגלות מתחה את האגן מאוחר בשלב המחובר, אחרי הפחיסות: לאחר שמרכז המסה של הירח עבר את קו הקורוטציה, הגוף הפחוס התעגל ונפרד, ובשחרור החלק הייצוני שלו כבר היה קשיח ועגול (מאמר 2, B.7§; מאמר 7). המתיחה היא אפוא חלק מן השלב המחובר; שום דבר בה אינו מחייב שהירח ישנה את צורתו לאחר שעזב את כדור הארץ.

נקודות ייחוס. נקודת הייחוס ששימשה קודם (23° צפון, 320° מזרח, והנקודה האנטיפודית שלה ב- 23° דרום, 140° מזרח) אינה הייחוס. במקומה באות היציאות של שני הברנרים: Imbrium (הראשי; נקודה אנטיפודית ב- 37.6° דרום, 160.0° מזרח) ו-Serenitatis (המשני; נקודה אנטיפודית ב- 27.3° דרום, 198.4° מזרח). הנקודה האנטיפודית של נקודה היא הנקודה הנמצאת מולה בדיוק בצדו השני של הכדור; החום שעלה מתחת ל-Imbrium ול-Serenitatis הגיע אל הצד הרחוק בשתי הנקודות האנטיפודיות האלה, ואותן אנו קוראים היציאות. מרכז הטבעת הפנימית — מרכז הכיפה, 51.4° דרום, 196.8° מזרח — נמצא 29.2° (כ- 885 ק"מ) דרום-מזרח ליציאת Imbrium ו- 24.1° (כ- 730 ק"מ) דרומה ליציאת Serenitatis. אלה המרחקים של היום, על הכדור. המרחק הזוויתי ההתחלתי, לפני ההתעגלות, תלוי בהארכה: מנקודת הייחוס הישנה 38° (1 : 0.637 : 0.601), 20° (1 : 0.3 : 0.28) ו- 7° (1 : 0.1 : 0.094); מן היציאות החדשות, עם המיפוי המלא של ההתעגלות (1 : 0.637 : 0.601), הציר הארוך לעבר מרכז אזור המגע, 24.1° צפון, 335.2° מזרח, Imbrium) 21.2° ו-Serenitatis) 17.0° ; ראו C.3 ואיור C.1. בקריאה בכיוון זה החישוב אומר: ככל שהגוף היה מוארך יותר, כך הכיפה שכנה בהולדתה קרוב יותר אל היציאה; עבור הצורה שבה משתמשת הסדרה היא שכנה כ- 17° – 21° מן היציאות, וההתעגלות פתחה זאת ל- 24° – 29° הנמדדות היום.

כיפות קטנות. מתחת לכל יציאה נמצא קרום דק מקומי — Ingenii (12–16 ק"מ, 5.7° מיציאת Imbrium) ואגן Apollo (9–5 ק"מ, 10° מיציאת Serenitatis). הכיפה הגדולה היא האזור הדק הרחב שבמרכז, מדרום להם. לכל יציאה יש אפוא כיפה קטנה משלה ישירות מעליה, והכיפה הגדולה נמצאת מעבר לשתייהן.

נבחן גם מנגנון דמוי ציר (hinge) לרכיב מזרח-מערב, והוא נדחה: בירח מחובר בסיבוב יציב אין כוח מזרח-מערב, והכוח הנובע מן העלייה החוצה קטן בערך פי 10^8 מן הנדרש.

שחזור המנגנון. אותו מיפוי שמותח את המרחקים משנה גם את גודלו של כל כתם של פני שטח, ואיתו את מספר המכתשים ליחידת שטח בכתם הזה: היכן שכתם מתכווץ, מכתשיו מצטופפים; היכן שהוא מתרחב, הם מתדללים. מאמר 7 מדד את ההשפעה הזאת כגורמי צפיפות; מיפוי ההרפיה משחזר אותם: קוטב $1.208 \times$ (1.21), צד $1.14 \times$ (1.14), הנקודה הפונה אל כדור הארץ $0.726 \times$ (0.73) — המספרים שבסוגריים הם אלה של מאמר 7. מיפוי אחד מסביר אפוא גם את עודף המכתשים בקטבים וגם את המתיחה של SPA.

STEP 6 כיצד זה מתיישב עם המודל

הטבלה מעמידה כל קביעה של המודל לצד המדידה הבודקת אותה.

מה המודל אומר	מה נמדד
מרחקו של SPA מן הקצה הרחוק גדל בגורם של כ-1.5 (מיפוי מלא; כ-1.6 הוא הגורם לזוויות קטנות ליד הקצה)	היום 39.5° מן הנקודה שמול מרכז המגע; בזמן הברנר כ- 27°
אגס שקצהו, ועליו הירח, עמד בכ- 22.5° מסיט את יציאת הזרם עד כ- 22.5° דרומה (C.4); ההתעגלות מגדילה זאת לכ- 33°	הרכיב הדרומי של ההפרדה: כ- 22° על הצורה הפחוסה, כ- 33° היום — כפי שנובא
הרכיב המזרחי בזמן הברנר כ- 15°	היום כ- 22° ; מקורו עדיין אינו מוסבר
הטבעת הפנימית היא שולי הכיפה; שתי הטבעות עוקבות אחר עובי הקרום	טבעת ב-22 מתוך 24 כיוונים; מרכזה כ-118 ק"מ מזרח-צפון-מזרח; הדופן תלולה בצפון-מזרח (30.7 מ' לק"מ), מתונה בדרום-מערב (11.5)

החישוב מניח שהכיוון אל הקוטב של אותו זמן קרוב לדרום של היום; הגודל הכולל ($27^{\circ} \leftarrow 39.5^{\circ}$) אמין יותר מחלוקתו לרכיבים. המרחקים והרכיבים נמדדים מן הנקודה שמול מרכז המגע (24.1° דרום, 155.2° מזרח) במיפוי המלא של C.3; גרסה קודמת, שנמדדה מן הנקודה שמול נקודת הייחוס הישנה 23° צפון, 320° מזרח, נתנה 34° – $36^{\circ} \leftarrow 48.6^{\circ}$, רכיב דרומי של $25^{\circ} \leftarrow 38^{\circ}$ ורכיב מזרחי של $20^{\circ} \leftarrow 30^{\circ}$.

השורה הראשונה היא ההתעגלות של שלב 5 בשורה אחת: מקומו של SPA על הצורה הפחוסה ועל הכדור. הגורם כ-1.6 שניתן בגרסאות קודמות הוא גורם הזוויות הקטנות של הקצה; הזוג $27^{\circ} \leftarrow 39.5^{\circ}$ הוא המיפוי המלא במרחקו של SPA. השורה השנייה מפרקת את ההפרדה הזאת לחלקה הדרומי ולחלקה המזרחי. לאגס — הצוואר של חומר שחיבר את הירח לכדור הארץ — היה בסיס שעמד בערך על המשווה של אותו זמן, וקצה שעליו ישב הירח, בכ- 22.5° ; הזרם שלו יצא מן הצד הרחוק מדרום לנקודה הנגדית בעד קו הרוחב של הירח (C.4); המיפוי המלא נותן חלק דרומי של כ- 22° על הצורה הפחוסה, שההתעגלות הגדילה לכ- 33° היום. החלק המזרחי גדל באותו אופן מכ- 15° לכ- 22° ; מדוע היה 15° בהתחלה — נשאר פתוח. השורה האחרונה היא הטבעת עצמה, כפי שנמדדה בשלב 1.

הכרעת המודל: מתאים

הטבעת הפנימית, הקיימת ב-22 מתוך 24 כיוונים, היא שולי הכיפה, ושתי הטבעות עוקבות אחר עובי הקרום שמסביב; ההתעגלות מעבירה את מרחקו של SPA מן הקצה הרחוק מכ- 27° ל- 39.5° של היום, עם רכיב דרומי של כ- 33° , כפי שנובא.

מה זה מראה. יש שתי טבעות, והפנימית היא הברורה והמדויקת יותר; מרחקה מן המרכז משתנה עם הכיוון. הטבעת הפנימית היא כנראה השפה האמיתית של האגן: היא אינה מתאימה לאליפסה המקובלת אלא למעגל שמרכזו מזרח-צפון-מזרח למרכז SPA. מה שחשוב אינו כמה התנגדות הייתה, אלא היכן: במערב היא הייתה קרובה, בשפה, ולכן החומר נערם בטבעת הפנימית; בכיוונים האחרים היא הייתה רחוקה יותר, והחומר נערם בטבעת החיצונית. לכן לטבעת החיצונית של B4 אין בליטה במערב, ואילו הטבעת הפנימית עומדת שם קרוב למרכז. הדופן תלולה בצד המתנגד (צפון-מזרח) ומתונה בצד המתנגד פחות (דרום-מערב), כצפוי וכפי שנמדד. מה שיש בידינו עכשיו: שפה אחת, שמרכזה נוטה לעבר הקרום העבה והיא תלולה מולו, והתעגלות ששינתה את המרחקים סביבה בלי להזיז אותה.

נתונים וקוד.

נתונים	מקור
עובי הקרום	GRAIL, מודלים 1 ו-4 (Wieczorek et al. 2013)
גובה	LOLA LDEM_4
אליפסה	Garrick-Bethell & Zuber 2009
קוד	b5.py (שיאים ב-24 כיוונים; התאמת צורה), ringsmap.py, b4xsec2.py

פתוח. מקור הרכיב הדרומי מוצג ב-C.4: מיקום האגס וכוחות הסיבוב, שהפחיסות הגדילה; הצירים של אותו זמן נשארים לעבודה עתידית. יש למדוד מחדש את השיא בדרום-מזרח לאחר הסרת Mendel–Rydberg; לשם כך נדרשים נתוני GRAIL ו-LDEM של חבילת הנתונים השנייה של SPA. (Mendel–Rydberg) הוא אגן צעיר יותר בשולי SPA; השפה שלו עצמו עשויה להוסיף לשיא הדרום-מזרחי החזק). יש למדוד את שיפוע הדופן של הטבעת החיצונית בכל כיוון. החישוב התלת-ממדי המלא, במערכת הצירים של זמן ההתעגלות, נדחה לעבודה עתידית. יש לבדוק בספרות אם תוארה ב-SPA טבעת פנימית נפרדת, מה המודלים מנבאים על מיקום הצווארון וצורתו, וכיצד מרכז SPA הנגזר מן הצווארון משתווה לזה הנגזר מן הטופוגרפיה. יש לשקול חזית התקררות שנייה: בטבעת הפנימית ההתקררות מבחוץ פנימה של B4 פעלה פחות. הרצפה בין 20° ל-40° מראה שיאים דמויי שיני מסור, הנקראים כפני שטח שנמתחו לחלקים בשלב הכיפה והתקמטו לשיניים כשהכיפה שקעה; המבחן הוא עד כמה הרצפה הזאת משוננת (הפיזור של עובי הקרום ושל הגובה בקני מידה של עשרות קילומטרים) בהשוואה למרכז ולחוץ האגן, והאם השיניים מסודרות בכיוון אחד (מקבילות לשפה).

4 THE RESEARCH • STUDY המחקר • מחקר 4

STEP 1 הגדרת שאלת המחקר והבעיה

התופעה. ממש בתוך השפה של SPA הקרום מתנשא בחדות. **הפער בידע.** האם זו טבעת בפני עצמה, היכן מרכזה ועד כמה תלולה הדופן הפנימית שלה בכל כיוון — לא נמדד. **שאלת המחקר:** האם יש טבעת פנימית של קרום מעובה סביב SPA, מה צורתה ומרכזה, והיכן הדופן שלה תלולה ביותר?

STEP 2 סקירת ספרות (רקע מדעי)

אגני פגיעה גדולים נושאים צווארון מורם של קרום מעובה; מודלים של SPA נותנים צווארון גדול מן הנמדד (Citron et al. 2024); פגיעה מן הצפון משאירה דופן צפונית תלולה ודרומית מתונה (Andrews-Hanna et al. 2025). **מה חדש כאן:** שיא עובי הקרום נמצא ב-24 כיוונים, מותאמת לו טבעת, והדופן שלה נמדדת כיוון אחר כיוון, בקרום ובגובה.

STEP 3 ניסוח השערת המחקר

הטבעת הפנימית היא שולי הכיפה שעלתה; צורתה נקבעת בידי עובי הקרום שסביבה: הדופן שלה תלולה בצד הקרום העבה בצפון-מזרח ומתונה בצד הדק בדרום-מערב, ומרכזה נמצא לעבר הקרום העבה של הצפון-מזרח, שאליו נערם החומר.

STEP 4 מערך המחקר (מתודולוגיה)

סוג המחקר: כמותי; מציאת שיאים והתאמה. **המדגם:** מודלים 1 ו-4 של GRAIL, שיאים בין 28° ל-44° מן המרכז ב-24 כיוונים; גובה מ-LOLA עבור הדופן. **הכלים:** קוד המוצא כל שיא ואת הבולטות שלו, מתאים מעגל מוארך שמרכזו חופשי, ומודד את המדרון התלול ביותר בין הרצפה לטבעת.

STEP 5 איסוף הנתונים (ביצוע המחקר)

השיאים נמצאו בשני המודלים באותו כלל, והטבעת הותאמה להם; הדופן נקראה בשמונה כיוונים. הערכים הם הטבלאות ואיורים B5.1–B5.2.

STEP 6 ניתוח הנתונים ועיבודם

הטבעת. קיימת ב-22 מתוך 24 כיוונים; רדיוס ממוצע 36.8° – 36.6° (כ-1,111–1,116 ק"מ); מרכז כ-108–118 ק"מ מזרח-צפון-מזרח למרכז SPA, ב- 51.4° – 52.4° דרום, 196.8° מזרח. המרחק. 36° – 44° בצפון-מזרח ובמזרח, 28° – 34° בדרום-מערב ובמערב. הדופן. התלולה ביותר בצפון ובצפון-מזרח (9.3° – 10.5° ק"מ ל-100 ק"מ בקרום; 25° – 31° מ' לק"מ בגובה), המתונה ביותר בדרום ובדרום-מערב.

STEP 7 הסקת מסקנות וכתובת הדוח

תוצאה. ההשערה נתמכת: קיימת טבעת פנימית, שמרכזה מזרח-צפון-מזרח למרכז האגן, שאינה האליפסה המקובלת, והדופן שלה תלולה ביותר בצד הצפון-מזרחי. **מגבלות.** השיאים תלויים במודל הקרום; הטבעת חסרה בשני כיוונים; תזמון המתיחה בידי ההתעגלות מוסק. **כיווני מחקר נוספים.** הטבעת והטבעת החיצונית יחד, מול עובי הקרום של הצד הרחוק, במודל נומרי של כיפה המתקררת משוליה פנימה.

B6 צפיפות ונקבוביות

בקצרה. בפני השטח יש ל-SPA נקבוביות כמו לרמות. בעומק הנקבוביות כמעט סגורות, והסגירה חזקה ביותר במרכז ונחלשת בהדרגה לעבר השפה. זה אותו מבנה כמו השקיעה של B2.

נקבוביות היא החלק של הנפח שהוא ריק: הסדקים והרווחים בין הגרגרים. קרקע שנשברה לרסיסים היא נקבובית, כמו ערימת חצץ; קרקע שחוממה ונלחצה היא דחוסה, כמו לבנה שנשרפה בכבשן, שהאבקה שלה התמזגה והנקבוביות שלה נסגרו. הנקבוביות של SPA בעומק היא אפוא תיעוד של מה שקרה לקרקע שלו: האם היא נופצה, או נאפתה ונדחסה. סעיף זה קורא את התיעוד הזה, ומוצא שהקרקע מתחת ל-SPA נדחסה, ויותר מכל במרכזו — הדפוס שמשאיר חום שהצטבר ונשמר הכי הרבה זמן מתחת למרכז, ואותו דפוס כמו העומק העודף של האגן ב-B2.

STEP 1 החריגה

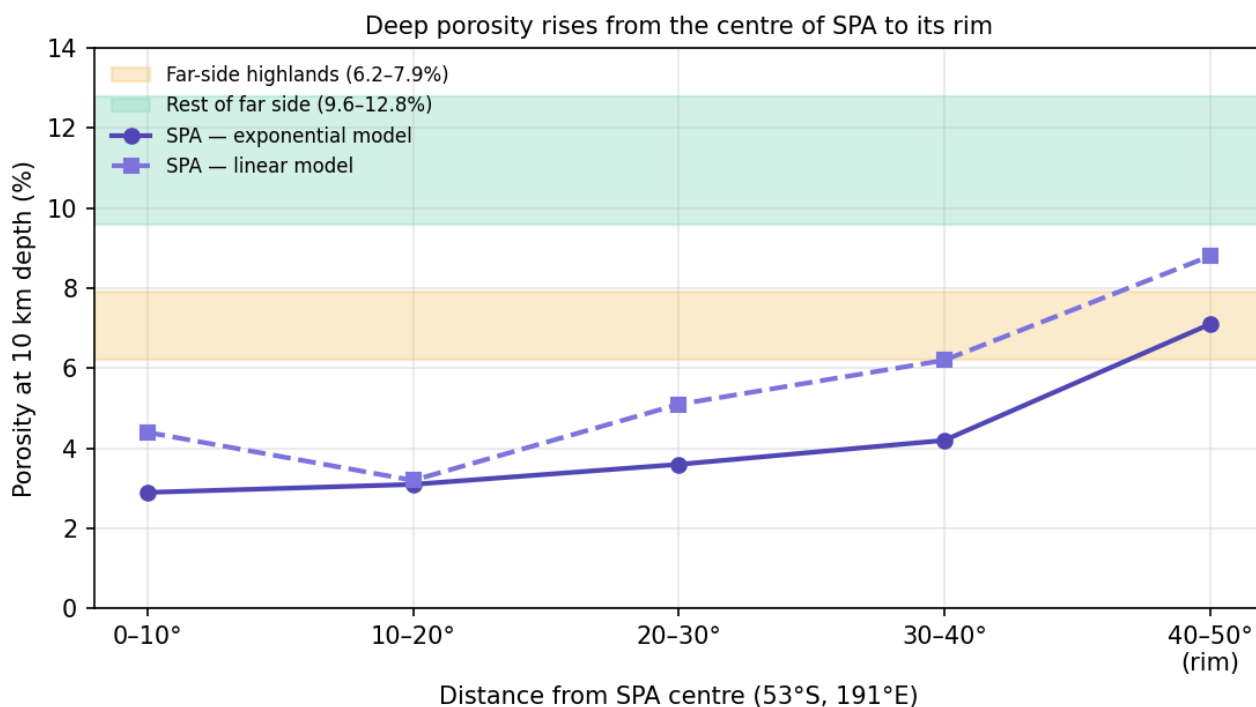
צפיפות הגרגרים, הצפיפות הכוללת בפני השטח, הנקבוביות בפני השטח והשתנותה עם העומק נלקחות מ-GRAIL (Wieczorek et al. 2013), עם מודלי עומק ליניארי ואקספוננציאלי לפי (Besserer et al. 2014), וצפיפות הגרגרים לפי (Huang & Wieczorek 2012). המונחים פשוטים. **צפיפות הגרגרים** היא צפיפות החומר המוצק עצמו, בלי רווחים; היא תלויה בהרכב (מינרלים עשירים בברזל כבדים יותר). **הצפיפות הכוללת** (bulk density) היא צפיפות הקרקע כפי שהיא מונחת, כולל הרווחים. השתיים קשורות זו לזו דרך הנקבוביות: צפיפות כוללת = צפיפות הגרגרים $\times$ (1 – נקבוביות). GRAIL נותן את הצפיפות הכוללת ליד פני השטח מן האופן שבו הכבידה עוקבת אחר הטופוגרפיה, וגם את הקצב שבו הצפיפות עולה עם העומק; מודלי העומק ממשיכים את העלייה הזאת כלפי מטה, בקצב קבוע (ליניארי) או בהתייבבות עם העומק (אקספוננציאלי). השימוש בשניהם מראה אם תוצאה תלויה בבחירה זו.

הערכים ממוצעים בטבעות סביב מרכז SPA (53° דרום, 191° מזרח) ומושויים לשני אזורי ייחוס, ושניהם משמשים: רמות הצד הרחוק (כיפה של 20° סביב 45° צפון, 180° מזרח) ושאר הצד הרחוק (חצי הכדור הרחוק מחוץ ל-SPA, כאשר SPA נלקח כ- 39.57° סביב 53° דרום, 191° מזרח). שני אזורי ייחוס מגינים מפני בחירה מקרית: הרמות הן הקרום שלא חומם מתחת ל-SPA, ושאר הצד הרחוק הוא הממוצע הרחב. מפני השטח ועד עומק 10 ק"מ (מודל ליניארי) הנקבוביות יורדת מ-19.7% ל-4.4% במרכז SPA, מ-20% ל-7.9% ברמות הצד הרחוק, ומ-14.5% ל-12.8% בשאר הצד הרחוק. בפני השטח SPA והרמות מתחילים מאותה נקבוביות; עד 10 ק"מ SPA איבד כמעט ארבע חמישיות מנקבוביותו, והרמות כשלוש חמישיות.

אזור	צפיפות הגרגרים	צפיפות בפני השטח	נקבוביות	נקבוביות ב-10 ק"מ
	(ק"ג/מ"ק)	(ק"ג/מ"ק)	בפני השטח	(אקספוננציאלי / ליניארי)
10°–0 SPA	3,005	2,412	19.7%	2.9% / 4.4%
20°–10 SPA	2,991	2,411	19.4%	3.1% / 3.2%
30°–20 SPA	2,952	2,395	18.9%	3.6% / 5.1%
40°–30 SPA	2,917	2,353	19.3%	4.2% / 6.2%
50°–40 SPA (השפה)	2,906	2,358	18.9%	7.1% / 8.8%
רמות הצד הרחוק	2,897	2,310	20.3%	6.2% / 7.9%
שאר הצד הרחוק	2,920	2,497	14.5%	9.6% / 12.8%

בדיקה: הנקבוביות בפני השטח חושבה מחדש ישירות ממפת GRAIL (porosity_1250-650): 10°–0: 19.746% (בטבלת הניתוח 19.745%, 20°–10: 19.373%, 30°–20: 19.373%, 40°–30: 19.32%, 50°–40: 19.35%).

כיצד לקרוא את הטבלה: כל שורה היא טבעת סביב מרכז SPA (חמש הראשונות) או אזור ייחוס (שתי האחרונות). שלוש העמודות האמצעיות הן פני השטח. צפיפות הגרגרים יורדת מ-3,005 ק"ג/מ"ק במרכז ל-2,906 בשפה: המרכז עשוי מחומר כבד יותר, עשיר בברזל. הנקבוביות בפני השטח, לעומת זאת, כמעט אינה משתנה, 18.9%–19.7% בכל טבעת, קרוב ל-20.3% של הרמות. את הקשר שלמעלה אפשר לבדוק בכל שורה: במרכז $2,412/3,005 \approx 0.80$, כלומר כ-20% ריק. העמודה האחרונה היא עומק 10 ק"מ, ושם התמונה משתנה: 2.9%–4.4% במרכז, העולים טבעת אחר טבעת ל-7.1%–8.8% בשפה, שהם בערך הערך של הרמות (6.2%–7.9%). במודל האקספוננציאלי העלייה רציפה מן הטבעת הראשונה; במודל הליניארי שתי הטבעות הפנימיות קרובות (4.4%-ו-3.2%), ומ-10°–20° והלאה העלייה רציפה.



איור B6.1. הנקבוביות בעומק 10 ק"מ כנגד המרחק ממרכז SPA (53° דרום, 191° מזרח), עבור המודל האקספוננציאלי (קו רציף) והמודל הליניארי (קו מקווקו), מול התחומים של רמות הצד הרחוק (6.2%–7.9%, ענבר) ושל שאר הצד הרחוק (9.6%–12.8%, ירוק).

איור B6.1 משרטט את העמודה האחרונה של הטבלה כנגד המרחק. על מה להסתכל: שני העקומים נמצאים מתחת לשתי הרצועות הצבועות של אזורי הייחוס לרוחב כל האגן, ומטפסים אליהן בשפה. בתוך SPA יש לקרקע בעומק 10 ק"מ פחות נקבוביות מאשר בכל מקום סביבה, ופחות ככל שקרבים למרכז.

STEP 2 החידה

מדוע לפני השטח של SPA אין נקבוביות פחותה מזו של סביבתו, בעוד שבעומק הנקבוביות כמעט סגורות? ומדוע הסגירה חזקה ביותר במרכז ונחלשת בהדרגה לעבר השפה?

STEP 3 מה המדע אומר

הצפיפות הגבוהה של רצפה SPA מוסברת בהרכב: חומר עשיר בברזל ובפירוקסן, בצפיפות גרגרים של כ-3,000 ק"ג/מ"ק (Huang & Wieczorek 2012). (פירוקסן הוא מינרל נפוץ הנושא ברזל ומגנזיום, כבד מן הפלדספר של הרמות). הנקבוביות בקרום הירח נוצרת בעיקר בשבירה בפגיעות, ונסגרת עם העומק תחת לחץ וזחילה (Wieczorek et al. 2013; Besserer et al. 2014). זחילה היא זרימה איטית של חומר מוצק תחת עומס; היא מה שמאפשר למשקל השכבות שמעל לסחוט את הרווחים עד שייסגרו, והיא מהירה הרבה יותר בחומר חם מאשר בחומר קר. בפגיעה גדולה הקרום מתחת לאגן נשבר ונעשה נקבובי יותר; חימום ממושך יכול לסגור נקבוביות.

STEP 4 היכן המדע אינו מספיק

מתיישב: צפיפות הגרגרים הגבוהה במרכז, הנובעת מן ההרכב.

אינו מתיישב: פגיעה מנבאת יותר שבירה ויותר נקבוביות מתחת לאגן; בעומק נמצאה פחות, 2.9%–4.4% במרכז לעומת 6.2%–12.8% בסביבה.

אינו מתיישב: הסגירה נחלשת ברציפות מן המרכז אל השפה בשני מודלי העומק; לפגיעה קצרת חיים אין מנגנון לכך. גם לחץ לבדו אינו מספק מנגנון: באותו עומק משקל השכבות שמעל הוא בערך אותו משקל בתוך האגן ומחוצה לו, ולכן הלחץ סוגר את הנקבוביות באופן שווה בכל מקום. מה שסוגר אותן יותר במקום אחד מאשר באחר הוא חום שנמשך, וסגירה הגדולה ביותר במרכז דורשת חום שהיה הגדול ביותר במרכז.

הכרעת המדע: מסביר בחלקו

ההרכב מסביר את הצפיפות; הוא אינו מסביר דחיסה בעומק הנחלשת בהדרגה מן המרכז החוצה.

STEP 5 מה המודל אומר

שכבות החומר החוזר היו מלאות נקבוביות. חומר שעלה מכדור הארץ, חם מאוד ועשיר בנדיפים, נחת על הירח הצעיר שוב ושוב והצטבר בשכבות שהשאירו חללים כשהנדיפים שלהן ברחו. חום הברורים, שיצא בצד הרחוק והצטבר מתחת ל-SPA, אפה אותן מלמטה, בעוצמה הרבה ביותר במרכז, שם נשמר הכי הרבה זמן. חומר חם זוחל, ותחת משקל השכבות שמעליו הרווחים נסחטים ונסגרים: הקרקע נאפתה ונדחסה, כמו חימר בכבשן. מקור החום שכך כשהפחיסות נרפתה, לפני השחרור, וכשהירח התרחק לחלל לאחר השחרור, ההתקררות השתלטה: השכבות האפופיות נדחסו והתכווצו, והנקבוביות נסגרו, בעיקר בעומק ויותר מכל במרכז. נקבוביות סגורות בעומק הן אפוא סימנה של קרקע שהוחזקה חמה זמן רב; ככל שהן סגורות יותר, כך היא הוחזקה חמה יותר או ממושך יותר, והמפל מן המרכז אל השפה הוא צורתו של מקור החום עצמו.

בפני השטח, סוג של פעפוע והתנדפות יצרו נקבוביות מחדש, ולכן פני השטח של SPA דומים לרמות. לא פרץ חומר מותך: החומרים הנדיפים התאדו ונמלטו כלפי מעלה דרך פתחים שפתחו לעצמם, שנסגרו שוב בחום, ומעברם השאיר את השכבה העליונה מלאה חללים, ואילו בעומק דבר לא פתח מחדש את הנקבוביות הסגורות.

הניבוי של המודל: בעומק, הנקבוביות סגורות יותר במרכז ופחות ככל שמתרחקים ממנו. הוא נבדק בשלב 6.

STEP 6 כיצד זה מתיישב עם המודל

הטבלה מעמידה כל קביעה של המודל לצד מה שערכי GRAIL מראים.

המודל אומר	מה נמצא
הנקבוביות נסגרו בעיקר בעומק	פני השטח 19.7% (כמו ברמות, 20.3%); ב-10 ק"מ -2.9 – 4.4% (לעומת 6.2–7.9% ברמות ו-9.6–12.8% בשאר הצד הרחוק) ✓
הסגירה חזקה ביותר במרכז ונחלשת החוצה	אקספוננציאלי: 2.9 → 3.1 → 3.6 → 4.2 → 7.1%; ליניארי: 4.4 → 3.2 → 5.1 → 6.2 → 8.8% ✓
הדחיסה היא השקיעה של B2	הפרש הנקבוביות כפול העובי (0–20 ק"מ) נותן כ-0.5–1.2 ק"מ; השארית של B2 היא 1.1–1.8 ק"מ בתוך 10° מן המרכז, 0.5–1.2 ק"מ ב-10–20° ו-0.2–0.3 ק"מ בשפה (גרסה קודמת ציטטה אותה כ-0.5–1.5 ק"מ). הדחיסה תואמת את השארית של הטבעת 10–20° ונותנת בין כשליש לכל השארית המרכזית, באותו מבנה, הגדול ביותר במרכז ✓
פני השטח נבנו מחדש בסוג של פעפוע של חומרים נדיפים	אין נקבוביות מופחתת בפני השטח ✓

השורה השלישית מחברת את הסעיף הזה ל-B2, והחשבון שלה פשוט. כאשר שכבה בעובי H מאבדת חלק $\Delta\phi$ מנפחה כשנקבוביותיה נסגרות, והסגירה נספגת בכיוון האנכי, ראשה שוקע ב- $H \times \Delta\phi$. הפרש הנקבוביות בין SPA לסביבתו, על פני 20 הק"מ העליונים, נותן שקיעה של כ-0.5–1.2 ק"מ. B2 מצא שרצפה SPA נמצאת עמוק יותר ממה שהקרום הדק שלה לבדו מסביר, ב-1.1–1.8 ק"מ בתוך 10° מן המרכז, 0.5–1.2 ק"מ ב-10–20°, ועד 0.2–0.3 ק"מ בשפה. הדחיסה בגודל השארית של הטבעת 10–20° ומהווה בין כשליש לכל השארית במרכז; את שאר השארית המרכזית המודל מייחס לחומר שאבד (B2). הנקבוביות שנסגרו הן רוב העומק שהיה חסר.

הכרעת המודל: מתאים

הנקבוביות סגורות בעומק ולא בפני השטח, הסגירה נחלשת מן המרכז אל השפה כפי שנובא, והדחיסה מסבירה חלק ניכר מן השקיעה של B2.

מה זה מראה. ערכי העומק מחושבים ממודלים (GRAIL מודד את פני השטח ואת ההשתנות עם העומק), ולכן הראיה עקיפה; היא עקיבית, עם זאת, בשני מודלי העומק ומול שני אזורי ההשוואה. הדחיסה בעומק וחלק ניכר מן השקיעה של B2 הם גודל אחד הנראה פעמיים, באותו מבנה מן המרכז החוצה: פעם כנקבוביות חסרות בכבידה, ופעם כגובה חסר בטופוגרפיה. מה שיש בידינו עכשיו: קרקע מתחת ל-SPA שנאפתה ונדחסה מלמטה, יותר מכל במרכז, כפי שחום שהצטבר מתחת למרכז דורש.

נתונים וקוד.

נתונים	מקור
צפיפות ונקבוביות בפני השטח	GRAIL, (porosity_l250-650) Wieczorek et al. (2013)
השתנות עם העומק	מודלים ליניארי ואקספוננציאלי, Besserer et al. (2014)

Huang & Wieczorek (2012)	צפיפות הגרגרים
results/*.csv- <code>density_analysis.py</code> ארכיון 14_GRAIL_density_ring_chatgpt	ניתוח הטבעות וההשוואות

פתוח. השקיעה חושבה מממוצעי הטבעות; חישוב מדויק מן המפות עדיין לא נעשה (אינו חוסם).

5 THE RESEARCH • STUDY המחקר • מחקר

STEP 1 הגדרת שאלת המחקר והבעיה

התופעה. רצפה SPA צפופה. **הפער בידע.** האם צפיפותה היא הרכב בלבד, או גם נקבוביות שנסגרו בעומק, וכיצד הסגירה משתנה מן המרכז אל השפה — לא נקרא טבעת אחר טבעת מול הצד הרחוק שסביבו. **שאלת המחקר:** כיצד הנקבוביות בפני השטח ובעומק משתנה ממרכז SPA אל שפתו, מול רמות הצד הרחוק ושאר הצד הרחוק?

STEP 2 סקירת ספרות (רקע מדעי)

צפיפות הגרגרים, הצפיפות הכוללת והנקבוביות ניתנות בידי (Wieczorek et al. 2013) GRAIL, עם מודלי עומק (Besserer et al. 2014) וצפיפות גרגרים מן ההרכב (Huang & Wieczorek 2012). הנקבוביות בקרום נוצרות בשבירה ונסגרות עם העומק תחת לחץ וזחילה. **מה חדש כאן:** הרשתות שפורסמו נקראות בטבעות סביב המרכז ומול שני אזורי ייחוס, בפני השטח ובעומק 10 ק"מ, בשני מודלי העומק.

STEP 3 ניסוח השערת המחקר

שכבות החומר החוזר נאפו מלמטה ונדחסו, יותר מכל בעומק ויותר מכל במרכז; לכן בפני השטח SPA נקבובי כמו סביבתו, ואילו בעומק נקבוביותו סגורות, יותר מכל במרכז ופחות לעבר השפה.

STEP 4 מערך המחקר (מתודולוגיה)

סוג המחקר: כמותי; ערכים לפי טבעת מול אזורי ייחוס. **המדגם:** רשתות GRAIL של צפיפות הגרגרים, הצפיפות הכוללת והנקבוביות, בטבעות של 10° סביב המרכז; רמות הצד הרחוק (כיפה של 20° סביב 45° צפון, 180° מזרח) ושאר הצד הרחוק. **הכלים:** קוד הממצע לפי טבעת בשקלול שטח, במודלי העומק הליניארי והאקספוננציאלי.

STEP 5 איסוף הנתונים (ביצוע המחקר)

כל טבעת וכל אזור ייחוס נקראו בכל רשת; הנקבוביות בפני השטח חושבה מחדש ישירות ממפת הנקבוביות, לשם בדיקה. הערכים הם הטבלה של שלב 1 ואיור B6.1.

STEP 6 ניתוח הנתונים ועיבודם

פני השטח. נקבוביות 18.9%–19.7% בכל טבעת, כמו ברמות הצד הרחוק (20.3%). ב-10 ק"מ. 2.9%–4.4% במרכז, 3.1%–3.2% ב-10°–20°, 3.6%–5.1% ב-20°–30°, 4.2%–6.2% ב-30°–40°, 7.1%–8.8% בשפה; לעומת 6.2%–7.9% ברמות הצד הרחוק ו-9.6%–12.8% בשאר הצד הרחוק. **הגרגרים.** 3,005 ק"ג/מ"ק במרכז לעומת 2,897–2,920 בסביבה.

STEP 7 הסקת מסקנות וכתובת הדוח

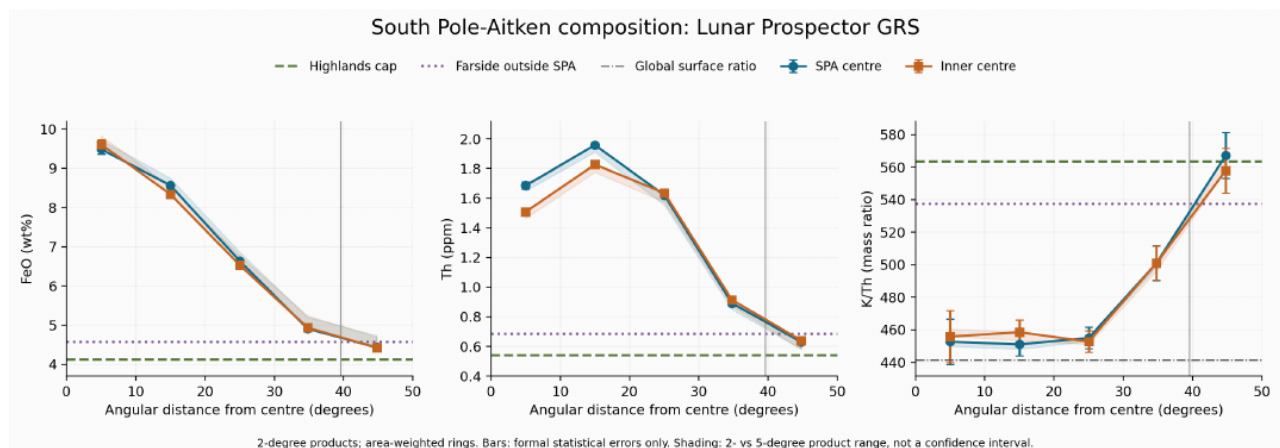
תוצאה. ההשערה נתמכת: פני השטח נקבוביים כמו סביבתם, ובעומק הנקבוביות סגורות יותר מכל במרכז, והסגירה נחלשת ברציפות עד השפה, בשני מודלי העומק. **מגבלות.** הנקבוביות בעומק מוחצנת (extrapolated) מן ההיפוכים שפורסמו ותלויה במודל העומק; צפיפות הגרגרים עצמה מוסקת מן ההרכב. **כיווני מחקר נוספים.** נקבוביות בעומק מהיפוך ישיר של הכבידה של SPA, כשצפיפות הגרגרים מקובעת לפי הדגימות שהוחזרו.

בקצרה. רצפה SPA עשירה בברזל, והברזל מרוכז באזור המרכזי ופוחת בהדרגה לעבר השפה. התוריום מועשר פי 2.4–3.6, אבל הוא שוכן בטבעת ובסהר לצפון-מערב. היחס בין האשלגן (נדיף במידה בינונית) לתוריום (עמיד בחום) נמוך בכל פנים האגן. גיל הנוריטים 4.25 מיליארד שנה.

הסעיפים שלפני סעיף זה קראו את צורתו של SPA: מכתשיו (B1), עומקו (B2), הקרום שלו (B3–B5) וסגירת נקבוביותיו בעומק (B6). סעיף זה קורא ממה עשויה הרצפה. שלושה יסודות נושאים את הסיפור. **ברזל** הוא יסוד כבד, ומקורו בעיקר בחומר עמוק. **תוריום** הוא יסוד רדיואקטיבי שאינו מתאדה גם בטמפרטורה גבוהה מאוד (הוא עמיד בחום, refractory), אבל עוזב את המוצק לטובת הנוזל בכל פעם שהמוצק מתחיל להיתך. **אשלגן** הוא נדיף במידה בינונית: חום חזק וממושך מסלק חלק ממנו כאדים. משום שהתוריום נשאר והאשלגן יכול לעזוב, היחס ביניהם, K/Th, הוא מדחום של חימום שהיה: ככל שאבד יותר אשלגן, היחס נמוך יותר. **נוריטים** הם חומר מאגמתי גס גרגר, שהתמצק לאט מהתכה בעומק.

STEP 1 החריגה

אנו משתמשים במפות GRS של PDS LP_9001 של Lunar Prospector (Prettyman et al. 2006; analyze.py), ממוצעות בטבעות סביב מרכז SPA וסביב מרכז הכיפה, ומושוות לרמות הצד הרחוק ולשאר הצד הרחוק (סקריפט הניתוח analyze.py). ספקטרומטר קרני הגמא (GRS) של Lunar Prospector מדד ממסלול את קרני הגמא שכל יסוד פולט מן הדצימטרים העליונים של פני השטח, ומהן מיפה ברזל, טיטניום, תוריום ואשלגן על פני הירח כולו. ממוצע טבעת מחבר את כל תאי המפה הנמצאים באותו מרחק זוויתי ממרכז, כך ששינוי מן המרכז החוצה בולט מעל הרעש של תאים בודדים. שני אזורי ההשוואה זהים לאלה של B6: רמות הצד הרחוק, קרום עתיק הרחוק מ-SPA, ושאר הצד הרחוק מחוץ ל-SPA. הם מראים כיצד נראה הצד הרחוק בלי החימום שהמודל ממקם מתחת ל-SPA.



איור B7.1. FeO, Th והיחס K/Th בטבעות סביב שני המרכזים (מרכז SPA, כחול; המרכז הפנימי של הכיפה, כתום), מול כיפת רמות הצד הרחוק (ירוק מקווקו) ומול הצד הרחוק שמחוץ ל-SPA (סגול מנוקד); בחלונות K/Th מוצג גם היחס הגלובלי של פני השטח. Lunar Prospector GRS מוצרים של 2 מעלות, טבעות משוקללות לפי שטח; הקווים הם שגיאות סטטיסטיות פורמליות בלבד, וההצללה היא הטווח בין המוצרים של 2 ו-5 מעלות. הקו האנכי מסמן את שפת SPA.

באיור כל עקומה נמשכת ממרכז SPA (משמאל) אל מעבר לשפתו (מימין). על מה להסתכל: עקומת הברזל יורדת בהתמדה מן המרכז אל השפה ופוגשת את קווי ההשוואה רק שם; עקומת התוריום עולה תחילה ומגיעה לשיא בטבעת השנייה לפני שהיא יורדת; עקומת K/Th נשארת שטוחה ונמוכה לאורך הפנים ומטפסת רק בשפה. שני המרכזים, של SPA ושל הכיפה, נותנים אותה תמונה, ולכן התוצאה אינה תלויה בבחירת המרכז.

טבעת (סביב מרכז SPA)	FeO (%)	TiO ₂ (%)	Th (ppm)	K (ppm)	K/Th
10°–0	9.48	0.85	1.69	763	451
20°–10	8.56	0.65	1.96	884	451
30°–20	6.63	0.51	1.62	738	455
39.57°–30	4.91	0.34	0.89	447	501
50°–39.57 (שפה)	4.43	0.36	0.63	358	567
רמות הצד הרחוק	4.12	0.33	0.54	303	563
שאר הצד הרחוק	4.57	0.41	0.68	368	537

בדיקה: קוד הניתוח מוריד את המפות מ-PDS ולא הורץ כאן מחדש (אין חיבור); היחסים והאחוזים שבטבלה נבדקו: $451 \approx 762.9/1.69$ (גרסה קודמת של הטבלה נתנה 453); $502 \approx 446.8/0.89$; $562 \approx 303.3/0.54$ (הפרשים של יחידה או שתיים מן הטבלה, 501 ו-563, נובעים מערכי Th שאינם מעוגלים); 15.8%-ו 19.6%.

הטבלה נותנת את אותן טבעות במספרים. FeO ו-TiO₂ הם תחמוצת ברזל ותחמוצת טיטניום, באחוזי משקל; Th ו-K הם תוריום ואשלגן בחלקים למיליון (ppm). ה-19.6% וה-15.8% שבהערת הבדיקה הם שני החסרים של K/Th בתוך SPA, מול הרמות ומול שאר הצד הרחוק, שהטקסט מעגל ל-16%–20%. קראו כל עמודה מלמעלה למטה: הברזל יורד למחצה מן המרכז אל השפה; התוריום גבוה ביותר בטבעת השנייה ויורד לרמת אזורי ההשוואה רק מעבר ל-30°; K/Th נשאר סביב 450 עד 30°, ואז עולה אל ה-537–567 של האזורים שבחוץ.

ברזל. מרוכז באזור המרכזי ופוחת בהתמדה אל השפה, סביב שני המרכזים. מרכז הכובד של העשירון העשיר ביותר נמצא באזור המרכזי, כ-150–200 ק"מ ממרכזי SPA והכיפה; טביעת הרגל של המכשיר היא כ-150 ק"מ. לכן אנו מדברים על אזורים. העשירון העשיר ביותר הוא העשירית של תאי המפה שבהם הכי הרבה ברזל; מרכז הכובד שלו הוא מיקומם הממוצע. טביעת הרגל היא כתם הקרקע שמדידה בודדת ממצעת עליו. מרחק של 150–200 ק"מ הוא בערך טביעת רגל אחת בלבד, ולכן המדידה יכולה למקם את הברזל באזור המרכזי, אבל לא לבודד בתוכו נקודה אחת.

תוריום. מועשר פי 2.4–3.6 לעומת אזורי ההשוואה בתוך 30° (גרסה קודמת נתנה 2–3.6), עם שיא בטבעת 10°–20°. ההרמוני הראשון מצביע מערב-צפון-מערב (280°): סהר שתיארו גם Moriarty et al. (2021), עם נקודות חמות עד כ-6 ppm. ההרמוני הראשון מתאר כיצד התוריום של טבעת משתנה כשמקיפים אותה: אם צד אחד של הטבעת עשיר מן האחר, ההרמוני מצביע לעבר הצד העשיר. כאן הוא מצביע מערב-צפון-מערב, כלומר התוריום אינו פרוש באופן שווה סביב המרכז אלא מרוכז בצד אחד שלו, בצורת סהר.

אשלגן לתוריום. K/Th הוא 455–451 בכל פנים האגן עד 30°, נמוך ב-16%–20% מאשר באזורי ההשוואה, ועולה רק לעבר השפה. השטיחות חשובה כמו הערך הנמוך: הפנים כולו איבד אשלגן באותה מידה, והשינוי מגיע רק בשוליים.

Chang'e-6. האשלגן כבד איזוטופית ($K \approx 0\delta^{41}$; Tian et al. 2026 עד +0.09%); גיל הנוריטים $4,247 \pm 5$ מיליון שנה (Su et al. 2025). איזוטופ הוא צורה של אותו יסוד במסה שונה. כשחומר מתאדה, האטומים הקלים עוזבים מעט בקלות רבה יותר, ולכן מה שנשאר מאחור נעשה מעט כבד יותר. $K\delta^{41}$ מודד, בחלקים לאלף, בכמה האשלגן של דגימה כבד מתקן; ערך כבד יותר מצביע על אשלגן שאבד כאדים. דגימות Chang'e-6, שהוחזרו ב-2024 מאגן Apollo שבצפון-מזרח SPA, הן הדגימות היחידות מן הצד הרחוק.

מאחורי הקלעים. מרכז ההרכב נבדק תחילה באמצעות צפיפות הגרגר. כשהתברר שצפיפות הגרגר מחושבת בעצמה מן הברזל והטיטניום של אותן מפות, הבדיקה הועברה אל מפות היסודות עצמן, והתוצאות מנוסחות ברמת אזורים.

STEP 2 החידה

מדוע הרצפה עשירה בברזל, והברזל מרוכז ופוחת בהדרגה לעבר השפה? מדוע התוריום שוכן לא במרכז אלא בטבעת ובסהר? מדוע היחס בין אשלגן לתוריום נמוך בכל פנים האגן?

STEP 3 מה המדע אומר

הפגיעה חפזה עמוק, אל הקרום התחתון ואולי אל המעטפת, ויצרה אגם התכה שעבר התמיינות; הנוריתים בני 4.25 מיליארד השנים הם תוצריו (Su et al. 2025). אגם התכה מתמייך כאשר, תוך כדי התקררותו, גבישים כבדים שוקעים וקלים צפים, כך שנוצרות שכבות בהרכב שונה. ארבעה אזורים מינרלוגיים מקיפים את המרכז (Moriarty & Pieters 2018). התוריום הוא חשיפה ופיזור של מעטפת שכבתית ושל חומר נזרק (Moriarty et al. 2021). האשלגן הכבד מיוחס להתאדות בפגיעה (Tian et al. 2026; מודל של אובדן של כ-2%).

STEP 4 היכן המדע אינו מספיק

לכל אחד מן הממצאים יש הסבר משלו בתוך קריאת הפגיעה, אבל כל הסבר עומד בנפרד: ברזל מאגם התכה, תוריום ממעטפת שכבתית, אשלגן מהתאדות רגעית.

מועד הפגיעה נקבע מן הגילים שנמדדו: ההסבר מתאים את הפגיעה לזמנים שהמדע מודד.

התאדות בפגיעה היא קצרה; לאורך כל פנים האגן היחס נמוך באופן אחיד. הבזק רגעי מחמם בעוצמה הרבה ביותר במקום שבו נופלת המכה, ופחות במקומות אחרים; אובדן אחיד על פני אזור שרוחבו כ-2,400 ק"מ דורש חום שהגיע אל כל הפנים באופן שווה.

הכרעת המדע: מסביר

לכל ממצא יש הסבר משלו בתוך קריאת הפגיעה: ברזל מאגם התכה, תוריום ממעטפת שכבתית ואשלגן מהתאדות.

STEP 5 מה המודל אומר

השאלה עבור המודל היא אם תהליך אחד נותן את ארבעת הממצאים בבת אחת: מפל הברזל, הטבעת והסהר של התוריום, השטוח והנמוך, והגיל.

הברנר. החום נכנס דרך שני ברנרים בצד הקרוב, Imbrium (עיקרי) ו-Serenitatis (משני), ויצא מולם בצד הרחוק, ב-37.6° דרום, 160.0° מזרח וב-27.3° דרום, 198.4° מזרח. שתי היציאות האלה הן האנטיפודים של מרכזי Imbrium (37.6° צפון, 340.0° מזרח) ו-Serenitatis (27.3° צפון, 18.4° מזרח); האנטיפודים שבתובת הסביבה, 37° דרום, 161.5° מזרח ו-25.4° דרום, 198.8° מזרח, הם אלה של נקודות הפתחים ששימשו לספירת המכתשים (Imbrium 37° צפון, 341.5° מזרח; Serenitatis 25.4° צפון, 18.8° מזרח). שני הזוגות רחוקים זה מזה 1.3° (Imbrium) ו-1.9° (Serenitatis). אגם ההתכה שמעל הברנר הוא האזור המרכזי שמדרום לשתי היציאות, שם החום הצטבר ונשמר הכי הרבה זמן (הכיפה הגדולה). מרכז הכובד של מכתשי התוריום נמצא 6.6° מציאת Imbrium. הברנר, כפי שהוצג ב-A.5, הוא מקור החום של המודל: חום וחומר שעלו מפנים כדור הארץ בזמן שהירח היה מחובר, עברו דרך הפתחים של הצד הקרוב, ויצאו בצד הרחוק מולם.

אגם ההתכה היה האזור המרכזי שבו חום הברנרים הצטבר ונשמר הכי הרבה זמן, ולכן כל מה שהיה שם הותר. חומר כבד ועמוק עלה עם החום; זו הסיבה שהברזל מרוכז באזור המרכזי ופוחת בהדרגה החוצה. המפל עוקב אחר החום: היכן שהחימום היה החזק והארוך ביותר, הגיע הכי הרבה חומר עמוק אל בסיס הקרום, והכמות פוחתת יחד עם החום לעבר השפה.

התוריום נדחק החוצה מן הכיפה יחד עם הקרום שהחליק ממנה (B3, שלוש הדרכים להדקת הקרום); זו הסיבה שהוא שוכן בטבעת ולא במרכז. כיפה העולה משילה את שכבתה העליונה אל הצדדים, כמו ערמת חול על שולחן שמורם מלמטה ומתפזרת החוצה; מה שהיה למעלה במרכז מגיע לטבעת סביבו.

התוריום עזב את המרכז גם עם הנוזל. הייתה זרימה לעבר הסהר, לא רק חומר מזק, והיא הוסטה בידי הסיבוב. תוריום כמעט אינו מתאדה, אבל הוא "בורח" אל הנוזל: בהתכה חלקית הוא עובר כמעט כולו אל ההתכה. בהתכה חלקית רק חלק מן המוצק נעשה נוזל, ויסודות מסוימים שאינם משתלבים היטב בגבישי המוצק, ובהם התוריום, עוברים כמעט כולם אל הנוזל הראשון הזה. במרכז, היכן שהחום היה החזק ביותר, נוצר הכי הרבה נוזל; הנוזל זרם החוצה, הוסט לעבר צד הסהר ונשא איתו את התוריום. במרכז נשאר שארית מדולדלת (1.7 ppm), ובסהר הצטבר נוזל מועשר (4–5 ppm בנקודות החמות). בקצה הרחוק, כשהירח מחובר, כוח הסיבוב הפועל על זרימה רחבה ואיטית במדרון מתון הוא מאותו סדר גודל כמו כוח המדרון. כוח הסיבוב כאן הוא הדחיפה הצידי שמערכת מסתובבת נותנת לכל דבר הנע לרוחבה (Coriolis). זרם מהיר במדרון תלול יורד ישר, משום שהמדרון שולט; זרימה רחבה ואיטית במדרון מתון חשה כוח מדרון חלש כמו הדחיפה הצידי, ונוטה הצידה, כפי שהזרמים הרחבים והאיטיים של האוקיינוסים של כדור הארץ מוסטים בידי סיבוב כדור הארץ. זו הסיבה שהזרימה החוצה לא התפזרה באופן שווה, אלא נטתה לצד אחד.

התנדפות על פני כל האזור המחומם: חימום חזק, מרוכז וממושך אידה לא רק מים אלא גם יסודות נדיפים במידה בינונית כמו אשלגן. האגן כולו הוא אזור מחומם (B8); זו הסיבה שהיחס נמוך בכל הפנים, עם מעבר בשוליים. ההבדל מקריאת הפגיעה הוא משך הזמן: חימום ארוך מלמטה פועל על כל השטח שמעליו, והאובדן זהה בכל מקום שהחום הגיע אליו; מחוץ לשטח זה האובדן נעצר, והיחס מטפס בשפה.

הגיל של 4.25 מיליארד שנה הוא זמן ההתכה מעל הברנר; הוא תומך בכך שהברנר פעל בתקופה שהמודל קובע. המודל ממקם את השלב המחובר בין תחילת הבנייה לבין השחרור ב-3.873 מיליארד שנה (B15); התכה שהתמצקה לאט בעומק לפני 4.25 מיליארד שנה נמצאת בתוך התקופה הזאת.

STEP 6 כיצד זה מתאים למודל

הטבלה מציבה כל אמירה של המודל לצד המדידה שבודקת אותה.

המודל אומר	מה נמצא
ברזל מרוכז, פוחת בהדרגה	9.5 ← 8.6 ← 6.6 ← 4.9 ← 4.4% ✓; אותו מבנה כמו ב-B8, B6, B1
התוריום נדחק לטבעת	שיא ב-10°–20°, לא במרכז ✓
התוריום עזב את המרכז עם הנוזל, והנוזל הוסט לעבר הסהר	מרכז 1.7 ppm; נקודות חמות בסהר 4–5 ppm ✓
התנדפות על פני כל האזור המחומם	455–451 K/Th בכל הפנים, נמוך ב-16–20% מאזורי ההשוואה; מעבר בשוליים ✓; אשלגן כבד איזוטופית ב-✓ Chang'e-6
התכה בתקופת הברנר	נורטים בני 4.25 מיליארד שנה ✓

מפל הברזל, הטבעת והסהר של התוריום, ה-K/Th הנמוך באופן אחיד וגיל הנוריטים נובעים כולם מהתכה והתנדפות מעל הברנר.

מה יש בידינו עכשיו. אספקת חום אחת, משני הברנרים, שנשמרה הכי הרבה זמן מתחת למרכז, חזקה וממושכת, נותנת את ארבעת הממצאים יחד: היא העלתה ברזל עמוק היכן שהייתה החזקה ביותר, דחקה את התוריום החוצה עם הקרום המחליק ועם הנזול הזורם החוצה, סילקה אשלגן באופן שווה על פני כל השטח המחומם, והתיכה את הנוריטים בזמנה שלה.

נתונים וקוד.

נתונים	מקור
K ,Th , ₂ TiO ,FeO	Prettyman et al. (2006) ,Lunar Prospector GRS LP_9001 (doi:10.1029/2005JE002656); PDS
אזורים מינרלוגיים	Moriarty & Pieters (2018) (doi:10.1002/2017JE005364)
סהר התוריום	Moriarty et al. (2021) (doi:10.1029/2020JE006589)
ברזל בצפון SPA	Ivanov et al. (2018) (doi:10.1029/2018JE005590)
אשלגן כבד	Tian et al. (2026), PNAS (doi:10.1073/pnas.2515408123)
נוריטים, 4.25 מיליארד שנה	Su et al. (2025), NSR (doi:10.1093/nsr/nwaf103)
Na/K בזכוכיות	Li et al. (2026), EPSL (doi:10.1016/j.epsl.2026.119980)
קוד ודוח	analyze.py ו-SPA_Composition_Report.pdf; תיקיית ארכיון 10-04-B7_2026

פתוח. (1) מדוע סהר התוריום שוכן דווקא בצפון-מערב. (2) יחס נמוך בין אשלגן לתוריום יכול לנבוע גם מערבוב של חומרים; המבחן הוא מודל ערבוב משותף של K ,Th ,FeO והמינרלוגיה, הבודק אם נשאר חוסר באשלגן התואם את האיזוטופים הכבדים. הנקודה הראשונה נדונה ב-B9, שם כיוון הסהר נגזר מן הסיבוב.

B8 מעט לבה גלויה

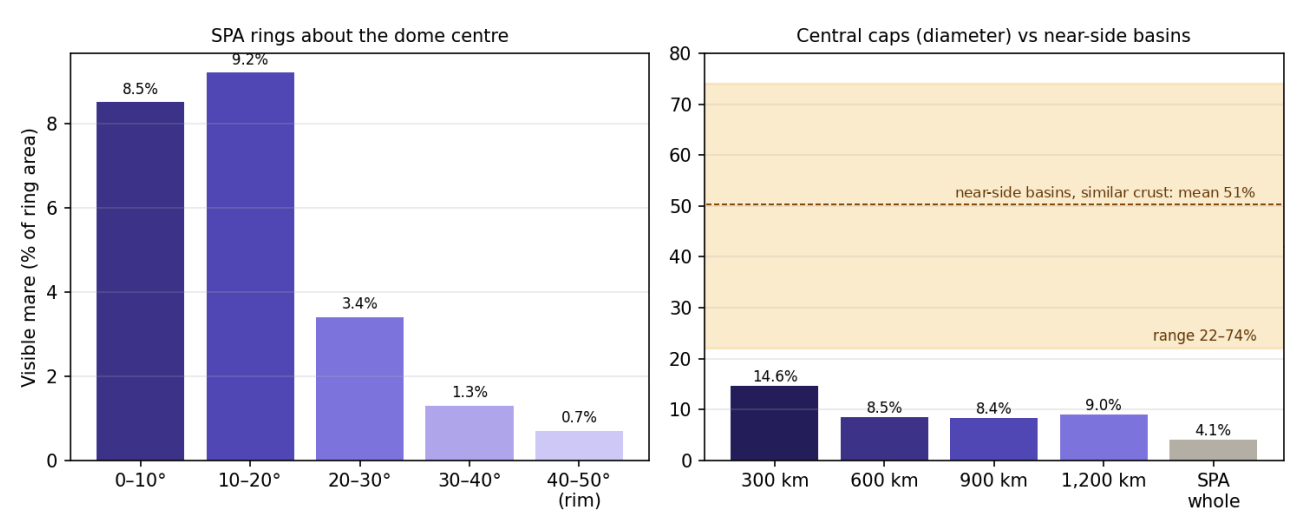
בקצרה. SPA, האגן העמוק ביותר, שהקרום שלו דק כמו באגני הצד הקרוב, מכוסה רק ב-4% לבה גלויה. מה שיש מרוכז במרכז. במודל, האגן עבר חימום והתכה מלמטה, לא שפיכה; רק במרכז, היכן שהחום היה החזק ביותר, יצא חומר.

לבה עולה היכן שהקרום דק והקרקע נמוכה, ובצד הקרוב האגנים העמוקים בעלי הקרום הדק מוצפים במישורי לבה כהים, הימות. SPA הוא העמוק מכל האגנים והקרום שלו דק כמו שלהם; לפי הכלל הזה הוא היה צריך להיות מן המוצפים ביותר. סעיף זה מודד כמה מעט לבה הוא נושא, היכן הלבה הזאת שוכנת, ומדוע.

STEP 1 החריגה

מונחים: אנו מדברים על "חימום" ועל "התכה מלמטה", לא על שפיכת לבה או חלחול. לבה גלויה פירושה ימות החשופים בפני השטח; לבה קבורה (cryptomare) פירושה לבה שכוסתה מאוחר יותר בחומר בהיר, נושא B9. ההבחנה חשובה כאן: אגן יכול להחזיק הרבה לבה שהעין כבר אינה רואה, אם חומר בהיר יותר נפל עליה אחר כך. סעיף זה סופר רק את מה שגלוי; B9 סופר את מה שמוסתר.

אנו משתמשים במפת הימות של LROC (LROC_GLOBAL_MARE_180), ממוצעת בטבעות סביב מרכז הכיפה (האזור של 51° דרום, 197° מזרח, מרכז הטבעת הפנימית, B5), ובעובי הקרום של GRAIL (מודל 1) במרכזי האגנים. מפת LROC משרטטת את קווי המתאר של כל ים חשוף על הירח מתוך תמונות של המצלמה של Lunar Reconnaissance Orbiter; GRAIL, זוג חלליות שמיפו את שדה הכבידה של הירח, נותן את עובי הקרום מתחת לכל נקודה.

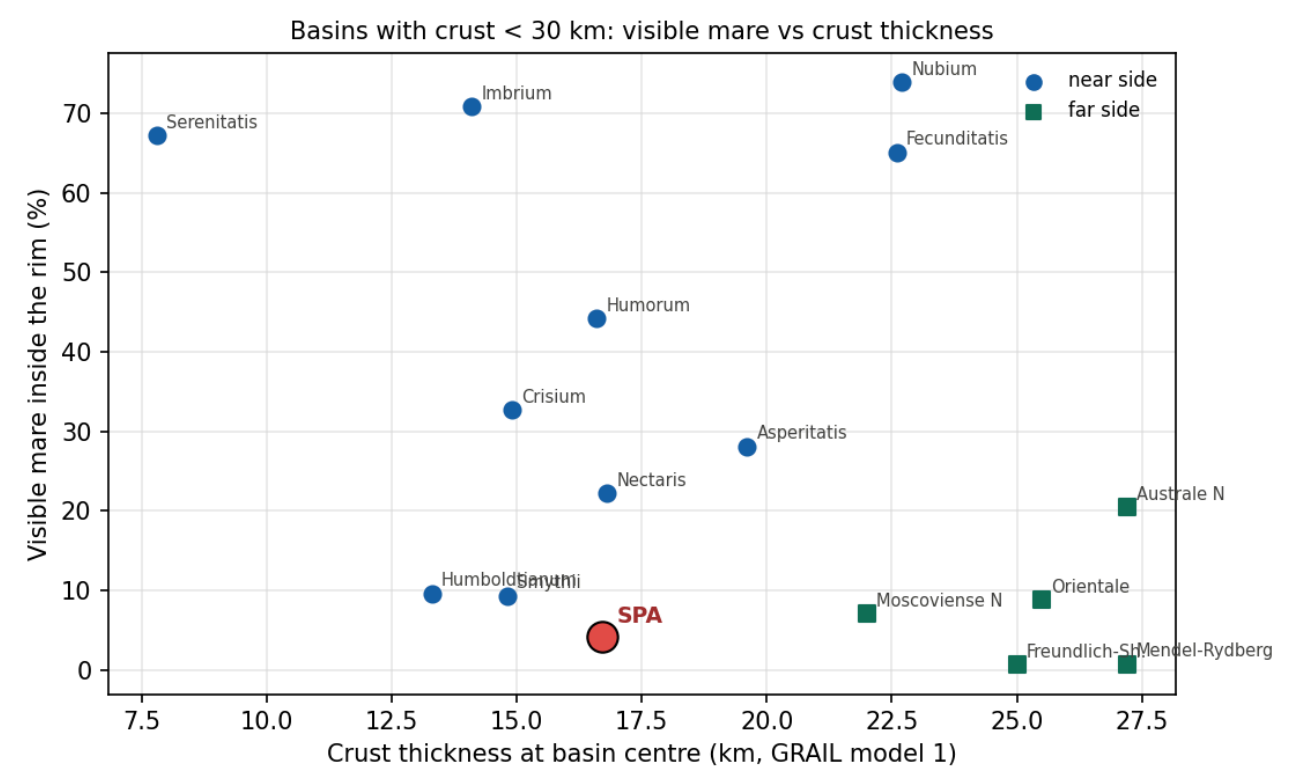


איור B8.1. משמאל: לבה גלויה (כיסוי ימות, % משטח הטבעת) בטבעות סביב מרכז הכיפה. מימין: כיפות מרכזיות בקטרים שונים (300, 600, 900 ו-1,200 ק"מ) ו-SPA כולו, מול שמונת אגני הצד הקרוב בעלי קרום דומה שבטבלה שלהלן, ללא אגני השוליים (טווח 22-74%, ממוצע 51%; גרסה קודמת נתנה ממוצע של 42%, שכלל את שני אגני השוליים, Smythii ו-Humboldtianum).

משמאל, החלק של כל טבעת המכוסה בלבה יורד מן המרכז החוצה. מימין, ככל שהכיפה סביב המרכז קטנה יותר, חלק הלבה שלה גדול יותר; אבל גם הכיפה בגודל של אגן בצד הקרוב נשארת מתחת לכל הרצועה של אגני הצד הקרוב בעלי קרום דומה.

לבה גלויה	אזור ב-SPA
8.5%	טבעת 0-10°
9.2%	טבעת 10-20°
3.4%	טבעת 20-30°
1.3%	טבעת 30-40°
0.7%	שפה 40-50°
14.6%	300 הק"מ הפנימיים
8.4%	כיפה מרכזית שרוחבה כ-900 ק"מ (בגודל של אגן בצד הקרוב)
4.1%	SPA כולו

הטבלה נקראת בשני חלקים. חמש השורות הראשונות הן הטבעות: כ-9% ב-20° הפנימיות, ויורד אל פחות מ-1% בשפה. שלוש השורות האחרונות הן שטחים הולכים וגדלים סביב המרכז: ככל ששטח כולל יותר מן האגן החיצוני, חלקו נמוך יותר, מ-14.6% ב-300 הק"מ הפנימיים עד 4.1% עבור SPA כולו.



איור B8.2. כל האגנים שהקרום במרכזם דק מ-30 ק"מ: עובי הקרום במרכז האגן (GRAIL מודל 1) מול הלבנה הגלויה בתוך השפה. עיגולים: הצד הקרוב; ריבועים: הצד הרחוק; SPA מסומן באדום.

האיור משווה שווה מול שווה: רק אגנים שהקרום במרכזם דק מ-30 ק"מ, כך שכל אחד מהם יכול היה להעביר לבנה באותה קלות כמו SPA. עיגולי הצד הקרוב יושבים גבוה; ריבועי הצד הרחוק יושבים נמוך; SPA, באדום, נמצא סמוך לתחתית — רק Freundlich-Sharonov ו-Mendel-Rydberg, עם קרום של 25–27 ק"מ, נושאים פחות — אף שהקרום שלו מן הדקים ביותר.

אגן	צד	קרום במרכז (ק"מ)	לבנה גלויה
Serenitatis	קרוב	7.8	67.2%
Imbrium	קרוב	14.1	70.8%
Crisium	קרוב	14.9	32.7%
Humorum	קרוב	16.6	44.2%
SPA	רחוק	16.7	4.1%
Nectaris	קרוב	16.8	22.2%
Asperitatis	קרוב	19.6	28.1%
Fecunditatis	קרוב	22.6	65.1%
Nubium	קרוב	22.7	73.9%
Humboldtianum	קרוב (קצה הדיסקה)	13.3	9.6%

9.3%	14.8	קרוב (קצה הדיסקה)	Smythii
7.1%	22.0	רחוק	Moscoviense N
0.6%	25.0	רחוק	Freundlich-Sharonov
8.8%	25.5	רחוק (קצה הדיסקה)	Orientale
0.7%	27.2	רחוק	Mendel-Rydberg
20.5%	27.2	רחוק	Australe N

בדיקה: לבה גלויה על הירח כולו 16.2% (בספרות כ-16%–17%); הצד הקרוב 30.1% (כ-31%); הצד הרחוק 2.3% (כ-2%).

הטבלה מונה את אגני האזור, ממוינים לפי צד ולפי עובי הקרום. SPA יושב בין Crisium, Nectaris ו-Humorum, עם קרום של 15–17 ק"מ, ובכל זאת נושא חמישית עד עשירית מן הלבה שלהם. הערת הבדיקה מאשרת שמפת הימות משחזרת את הסכומים של הספרות, ולכן הערך הנמוך של SPA אינו תוצר של המפה.

STEP 2 החידה

מדוע SPA, האגן העמוק ביותר, עם קרום של כ-17 ק"מ במרכזו כמו Crisium, Nectaris ו-Humorum, מכוסה רק ב-4% לבה גלויה, כשאגני הצד הקרוב בעלי קרום דומה מכוסים ב-22%–74%? ומדוע מה שיש מרוכז במרכז?

STEP 3 מה המדע אומר

לצד הרחוק יש פחות מקורות חום (KREEP מרוכז בצד הקרוב), והמעטפת מתחת ל-SPA מדולדלת; לכן פחות מאגמה הגיעה אל פני השטח. KREEP הוא חומר ירחי עשיר באשלגן (K), ביסודות אדמה נדירים (REE) ובזרחן (P), ויחד איתם בתוריום ובאורניום, שהדעיכה הרדיואקטיבית שלהם מחממת את הקרקע סביבם. מעטפת מדולדלת היא מעטפת שכבר הופקה ממנה התכה, כך שנשאר בה מעט להיתך שוב. הלבה הקיימת מתנקזת אל המקומות הנמוכים: מרכז האגן ומכתשים עמוקים בתוכו.

STEP 4 היכן המדע אינו מספיק

עקבי: הבדל כללי בין שני הצדדים; אגני הצד הרחוק בעלי קרום דק מכוסים בממוצע ב-7%.

לא עקבי: גם בצד הרחוק SPA נמצא סמוך לתחתית, מתחת לכל אגן בצד הרחוק שקרומו דק מ-25 ק"מ (רק Mendel-Rydberg ו-Freundlich-Sharonov, עם קרום של 25–27 ק"מ, נושאים פחות), אף שהוא העמוק מכולם; וכיפה מרכזית בגודל של אגן בצד הקרוב (8.4%) מכוסה פחות מכל אגן בצד הקרוב בעל קרום דומה.

הכרעת המדע: מסביר בחלקו

ההבדל בין שני הצדדים מסביר מדוע אגני הצד הרחוק נושאים מעט לבה; הוא אינו מסביר מדוע SPA, העמוק ביותר, נמצא סמוך לתחתית גם בצד הרחוק, ולא מדוע כיפה מרכזית בגודל של אגן נושאת פחות מכל אגן בצד הקרוב בעל קרום דומה.

STEP 5 מה המודל אומר

SPA עבר חימום והתכה מלמטה, לא שפיכה. רוב האגן הוא אזור מחומם שממנו לא יצאה לבה; הוא נכנס לחישוב האחוז כשטח עצום ומדלל אותו. אחוז הוא לבה מחולקת בשטח: שטחו של SPA גדול פי כמה משל אגן בצד הקרוב, וכמעט כל השטח הנוסף הוא קרקע מחוממת שמעולם לא התפרצה. אותה לבה, הפרושה על מכנה גדול בהרבה, נותנת חלק קטן.

במרכז החומר ספג את החום הרב ביותר, ההתכה הגיעה למצב דמוי לבה, ושם יצא חומר, לא מעבר לשוליים. החום ירד מן המרכז החוצה, ורק היכן שהיה הגבוה ביותר נעשתה ההתכה נוזלית מספיק כדי להגיע אל פני השטח; רחוק יותר הקרקע חוממה והותכה בחלקה, אבל ההתכה נשארה מתחת.

בתחילה היה במרכז ים רגיל, ולא קטן. החום של האזור כולו מחק אותו; עקבותיו הקבורים הם נושא B9. המעטפת מתחת ל-SPA מדולדלת משום שהיה חום בבסיסה (ראו B13). חום שמתוך את בסיס המעטפת שוב ושוב מושך ממנו את ההתכה בכל פעם, ומשאיר שארית שנותר לה מעט לתת. החום גם מחק את רשומת המכתשים; המכתשים שעל SPA היום הם חומר חוזר שנחת לאחר שהאזור התקרר (ראו B1).

STEP 6 כיצד זה מתאים למודל

המודל אומר	מה נמצא
מעט לבה גלויה: לא הייתה שפיכה	4.1% על SPA כולו ✓
הלבה מרוכזת במרכז, היכן שהחום היה החזק ביותר	14.6% ב-300 הק"מ הפנימיים; 8.5–9.2% בטבעות הפנימיות; 0.7–1.3% בשוליים ✓
הדילול מסביר את רוב הפער	מ-4.1% לאגן כולו ל-8.4% לכיפה מרכזית בגודל של אגן: הפער לצד הקרוב יורד מפי 5–18 לפי 2.6–9 (22.2/8.4 עד 73.9/8.4; גרסה קודמת נתנה 1.5–9) ✓
הפער הנותר הוא הים המרכזי שנמחק	ניבוי ל-B9: לבה קבורה מרוכזת במרכז
אותו מבנה מן המרכז החוצה	כמו בנקבוביות בעומק (B6), בחומר הכבד (B7) ובחוסר המכתשים (B1) ✓

השורה השלישית היא המפתח. השוואה של SPA כולו לאגן בצד הקרוב משווה שטחים בגדלים שונים מאוד; השוואה של כיפה מרכזית בגודל של אגן בצד הקרוב מסלקת את ההבדל הזה. הפער מצטמק בערך בחצי, ומה שנשאר הוא נושא השורה הרביעית: הלבה שהייתה שם ועכשיו מוסתרת.

הכרעת המודל: מתאים

SPA נושא מעט לבה גלויה, ומה שיש לו שוכן במרכז, כפי שחימום והתכה מלמטה דורשים; הדילול בידי השטח המחומם הגדול מסביר את רוב הפער לאגני הצד הקרוב.

נתונים וקוד.

נתונים	מקור
ימות	(LROC Global Mare Map (LROC_GLOBAL_MARE_180, ארכיון הנתונים המשותף
עובי הקרום	GRAIL, מודל 1 (Wieczorek et al. 2013); grail_compact.npz
אגנים	Neumann et al. (2015) ((neumann_basins_ge500.csv

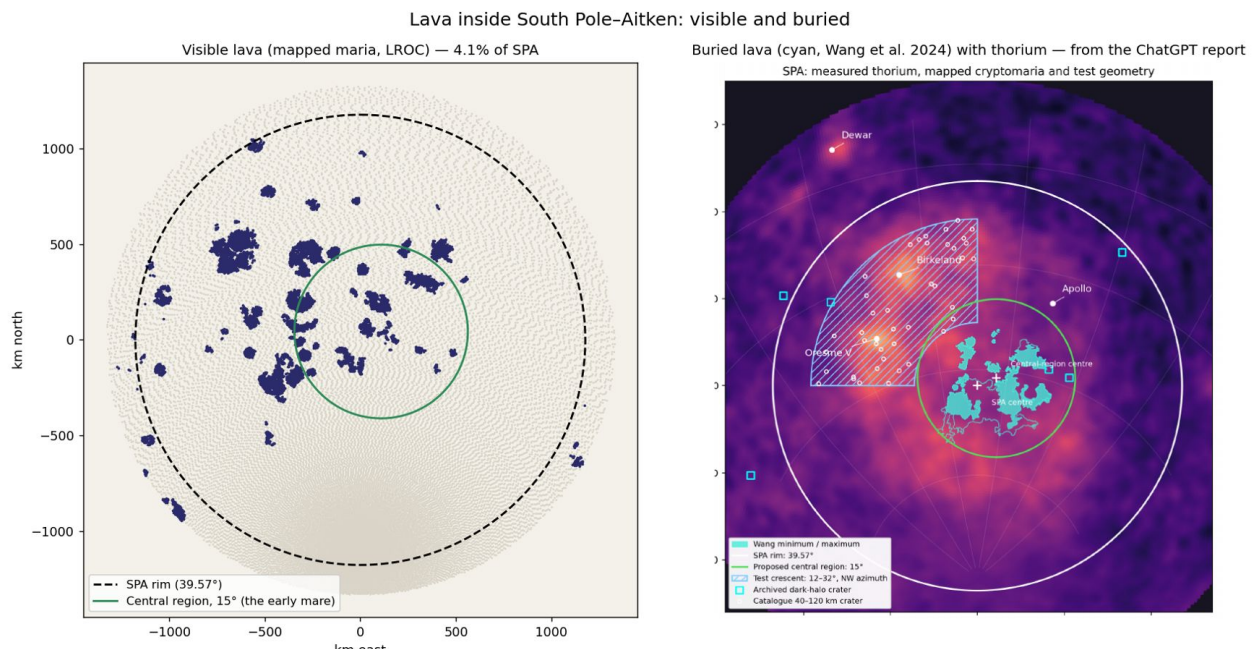
B9 בזלות קבורות והים המרכזי

בקצרה. בתוך המעגל המרכזי של 15° יש לבה קבורה, ושם גם הלבה הגלויה צפופה. במערב-צפון-מערב שוכן סהר תוריום רחב, שנחלש עם המרחק מן המרכז. במודל, הלבה הקבורה היא הים המרכזי המקורי, הפתח שפלט חומר. החומר הנפלט, בזמן שהירח היה מחובר ומסתובב מהר, נפל מאחור לצד אחד ויצר את הסהר. לאחר השחרור הים נרגע; הוא נשאר חם וקפא לאט, והמרבצים המתוארכים, המשתרעים על פני כ-1.5 מיליארד שנה, מתעדים את הקפיאה האיטית הזאת.

B8 השאיר פער: אפילו כיפה מרכזית בגודל של אגן בצד הקרוב נושאת פחות לבה גלויה מאגני הצד הקרוב, והמודל ניבא שהחלק החסר קבור במרכז. סעיף זה מחפש את הלבה המוסתרת הזאת ומוצא אותה בתוך המעגל המרכזי. אחר כך הוא קורא את סהר התוריום של B7 כחומר שהים המרכזי הזה פלט בזמן שהירח היה מחובר וסב מהר, ובודק את הקריאה הזאת בהדמיה של המקום שבו חומר כזה נוחת. לבסוף הוא קורא את גילי הלבה כחיי הארוכים והדועכים של אותו פתח.

STEP 1 החריגה

מונחים: **התכה** היא התהליך שבו חומר נעשה נוזל; הוא יכול להתמצק בעומק בלי לצאת (גבישים גדולים, בלי בועות, כמו הנוריטים של Chang'e-6). **לבה** היא חומר מותך שהגיע אל פני השטח, זרם והתמצק (גבישים קטנים או זכוכית, בועות, מישורים כהים). **לבה גלויה** פירושה ימות חשופים; **לבה קבורה** (cryptomare) פירושה לבה שזרמה וכוסתה מאוחר יותר. הגבישים מבדילים בין השתיים בגלל זמן ההתקררות: התכה שמתקררת לאט בעומק מספיקה לגדל גבישים גדולים, ואילו לבה שהתקררה מהר בפני השטח קופאת לגבישים קטנים או לזכוכית, והגז הבורח ממנה משאיר בועות.



איור B9.1. משמאל: לבה גלויה (מפת הימות של LROC), 4.1% מ-SPA. מימין: לבה קבורה (תכלת, ההיקף המינימלי והמקסימלי של Wang et al. 2024) על גבי התוריום שנמדד, מתוך דוח הניתוח החיצוני. המעגל הירוק הוא אזור הים המוקדם, 15° סביב מרכז הכיפה; שפת (39.57°) SPA מוצגת בשחור (משמאל) ובלבן (מימין).

שתי החלוניות מציבות את הלבנה הגלויה ואת המוסתרת זו לצד זו. מה שיש להסתכל עליו הוא המעגל הירוק: כתמי התכלת של הלבנה הקבורה נופלים כמעט כולם בתוכו, וכך גם רוב הלבנה הגלויה; מחוץ למעגל, לעבר השפה, יש מעט משתייה. לבה קבורה מזוהה ממסלול לפי החומר הכהה שמכתשים קטנים חופרים מתחת לכיסוי בהיר, ולפי הכימיה של הכיסוי עצמו; Wang et al. (2024) נותנים קו מתאר מינימלי ומקסימלי, ושניהם מוצגים.

נמדד	ערך	מקור
לבה קבורה בתוך המעגל המרכזי של 15°	13.6–24.1% (היקף מינימלי / מקסימלי)	Wang et al. (2024); חיתוך מפות, ניתוח חיצוני
לבה קבורה מחוץ למעגל	כמעט אין	איור B9.1
לבה גלויה ב-SPA כולו / ב-300 הק"מ הפנימיים	14.6% / 4.1%	B8
נפח מרבצי הלבנה הגלויה בתוך SPA ובסביבתו	129 מרבצים; עובי כ-31–273 מ'; נפח כ-1–2,630 קמ"ק; במרכז SPA קטנים מאשר במכתשים הגדולים שמצפון	Pasckert et al. (2018)
מכתשי הילה כהה (החושפים לבה קבורה)	2 בתוך המעגל המרכזי; קטלוג דליל, אינו מספיק להסקה	Checketts et al. (2023); Izquierdo et al. (2024)

שתי השורות הראשונות נושאות את הממצא: שביעית עד רבע מן המעגל המרכזי מסתירים לבה קבורה, ומחוצה לו כמעט אין. בצירוף הלבנה הגלויה של אותו מעגל, הדבר סוגר חלק גדול מן הפער ש-B8 השאיר. השורה הרביעית מראה שהמרבצים הגלויים קטנים ודקים, עשרות עד כמה מאות מטרים; השורה האחרונה רושמת סמן שני ובלתי תלוי, דליל מכדי להישען עליו. **מכתש הילה כהה** הוא מכתש קטן שפרץ דרך הכיסוי הבהיר והשליך את הלבנה הכהה שמתחתיו סביב שפתו.

הגילים.

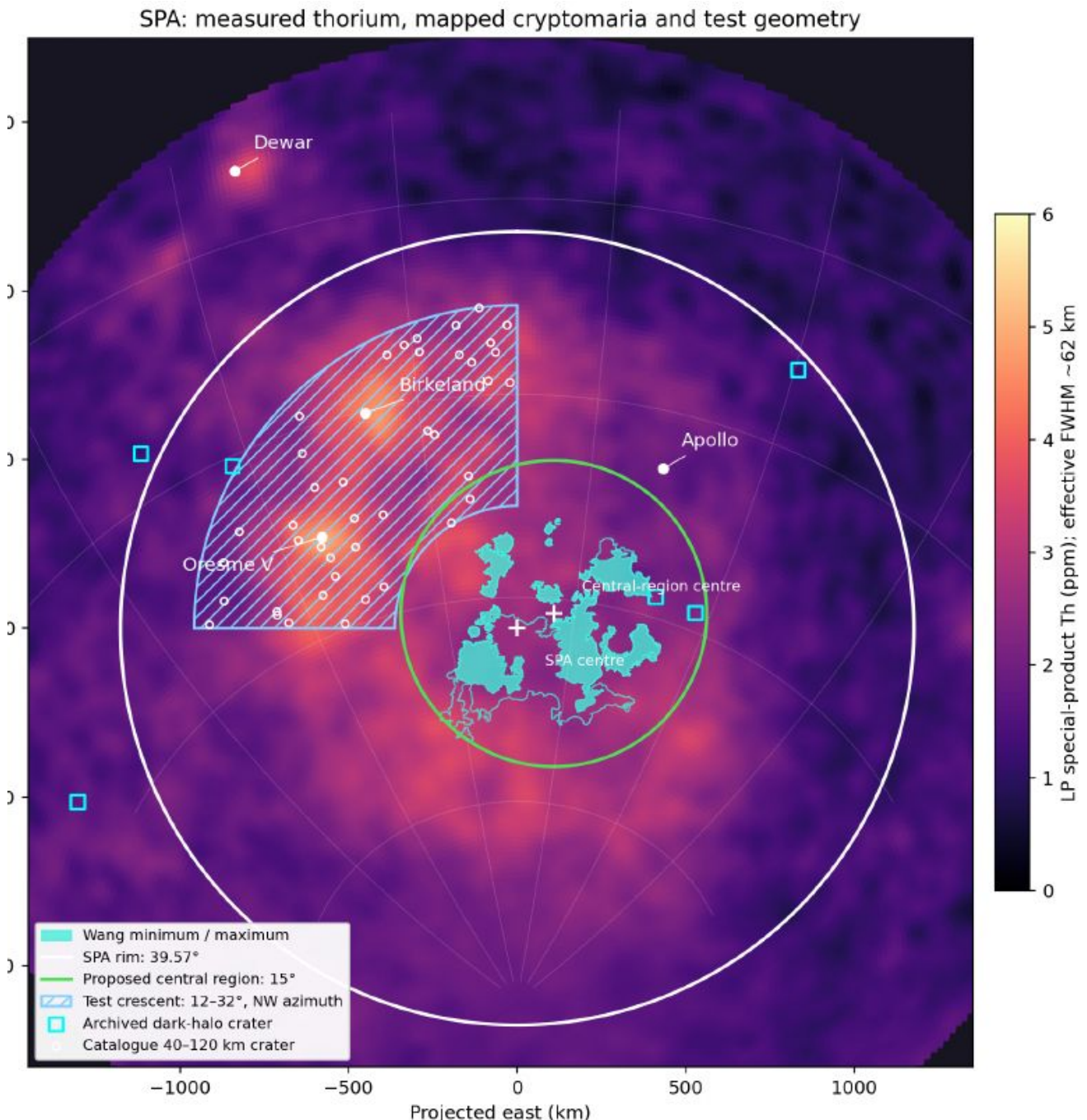
שיטה	מה נמדד	גיל
ספירת מכתשים (מרחוק)	101 מתוך 129 מרבצי הלבנה הגלויה	2.2–3.7 מיליארד שנה; שיא 3.2–3.6
ספירת מכתשים, אתר Chang'e-6	הים הדרומי של Apollo, החלק המערבי	1.54–2.98 מיליארד שנה
מעבדה, Chang'e-6 (אתר אחד)	כ-99% משברי הבזלת	כ-2.8 מיליארד שנה
מעבדה, Chang'e-6	שבר בזלת אחד עשיר באלומיניום בהרכב שונה, ממקור מאגמה אחר	כ-4.2 מיליארד שנה
מעבדה, Chang'e-6	נוריטים: התכה שהתמצקה לאט	4.25 מיליארד שנה (B7)

אתר הנחיתה של Chang'e-6 (כ-41.6° דרום, כ-206° מזרח) נמצא כ-11.6° ממרכז הכיפה, בתוך המעגל של 15°.

בטבלה עומדים שני סוגי גיל. **ספירת מכתשים** מתארכת פני שטח ממסלול: ככל שפני שטח חשופים זמן רב יותר, הם אוספים יותר מכתשים, ולכן צפיפות המכתשים נותנת גיל; היא מתארכת את ראש המרבץ, הלבנה האחרונה שזרמה שם. גילי **מעבדה** באים מן הדעיכה הרדיואקטיבית הנמדדת בדגימות שהוחזרו, ומתארכים את הרגע שבו שבר התמצק. בקריאה מלמטה למעלה הטבלה עוברת מן העתיק ביותר אל הצעיר ביותר: הנוריטים שהתקררו לאט, שבר בזלת עתיק אחד ממקור עשיר, הגוף העיקרי של המרבצים הגלויים, והלבנה האחרונה

באתר Chang'e-6. הטווח של המרבצים הגלויים המתוארכים, מ-3.7 עד 2.2 מיליארד שנה, הוא ה"כ-1.5 מיליארד שנה" של פסקת הפתיחה. B15 סופר את כל החומר המותך של האזור, מן הנוריטים שהתמצקו בעומק לפני 4.25 מיליארד שנה ועד הלבה האחרונה ב-2.2 מיליארד שנה, ולכן מדבר על 2 מיליארד שנה לפחות; שני המספרים מוודדים דברים שונים ואינם סותרים. כל גילי המעבדה באים מתוך מעגל הים המרכזי.

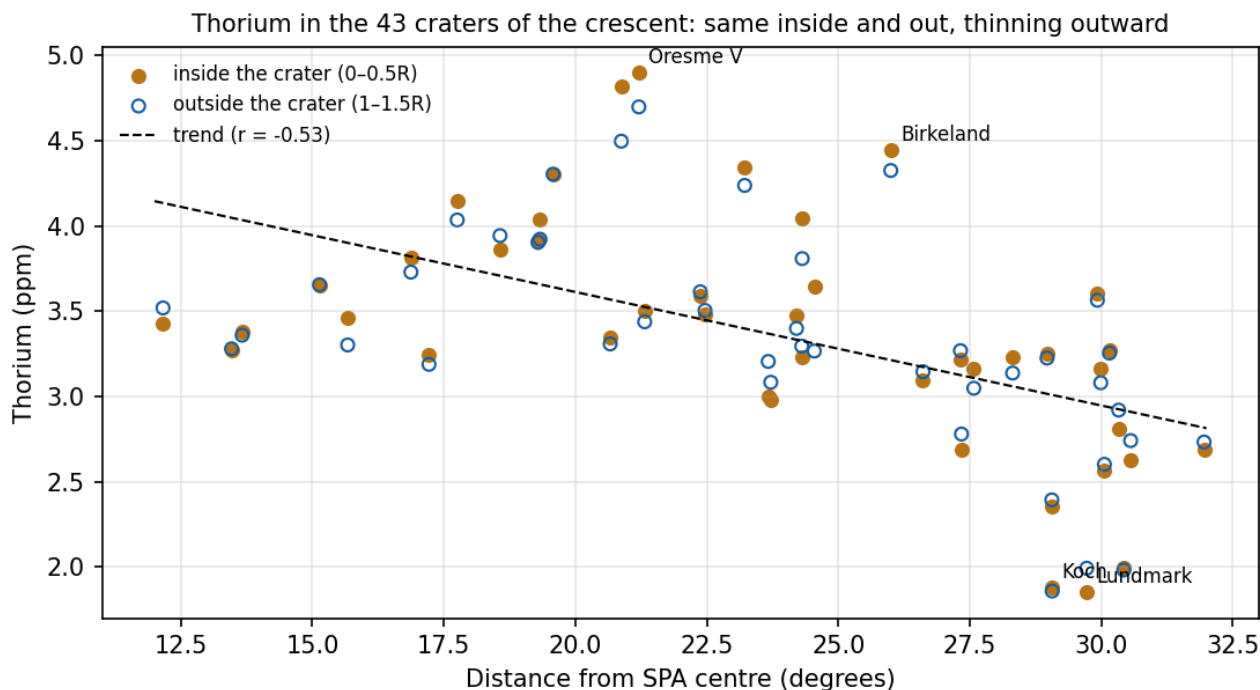
סהר התורים. B7 מצא שהתורים של SPA שוכן בצד אחד, במערב-צפון-מערב. כאן הסהר ממופה מכתש אחר מכתש, כדי ללמוד אם הוא שכבה המכסה את הקרקע או חומר שנחפר מלמטה.



can fill / outlines: published minimum / maximum cryptomaria extents, not a new interpretation

איור B9.2. תורים (Lunar Prospector, מוצר של חצי מעלה), היקפי הלבה הקבורה (תכלת), גבול אזור המבחן של הסהר (מקווקו באלכסון; 12°-32°, איזמוט צפון-מערבי), 43 המכתשים של 40-120 ק"מ, מכתשי הילה כהה מן הארכיון (ריבועים), ו-Dewar מחוץ לשפה. מתוך דוח הניתוח החיצוני.

המפה מראה את הסהר כרצועה של תוריום גבוה ממערב ומצפון-מערב למרכז, 12°–32° ממנו, מחוץ למעגל הבלה הקבורה. האזור המקווקו הוא האזור שנבדק; 43 המכתשים שבתוכו הם המדגם שמשמש להלן.



איור B9.3. תוריום ב-43 המכתשים של הסהר, בתוך כל מכתש (0.5R–0, מלא) ומחוצה לו (1–1.5R, ריק), מול המרחק ממרכז SPA. בפנים ובחוץ כמעט שווים (הפרש ממוצע 0.03 ppm), והתוריום פוחת עם המרחק מן המרכז ($r = -0.53$). Koch ו-Lundmark (כ-1.9 ppm) נמצאים בקצה המערבי.

איור זה שואל את השאלה המכרעת. אילו התוריום היה שכבה עמוקה שהמכתשים חפרו, רצפה כל מכתש הייתה עשירה מן הקרקע שסביבו. אין זה כך: בפנים ובחוץ כמעט זהים. התוריום שוכן אפוא פרוש על פני השטח ככיסוי, והמכתשים שנוצרו בו מאוחר יותר רק בחשו אותו. התוצאה השנייה היא השיפוע: r הוא מקדם המתאם, הנע מ-1 (ירידה מושלמת) דרך 0 (אין קשר) עד +1 (עלייה מושלמת); $r = -0.53$ הוא ירידה ברורה של התוריום עם המרחק מן המרכז, כפי שכיסוי שנפלט מן המרכז היה מידלדל ככל שהוא מתפשט.

נמדד	ערך
מכתשים מעל 3 ppm (בפנים / בחוץ)	32 / 34 מתוך 43
הנקודות החמות החזקות ביותר	Birkeland (4.45 ppm) ו-Oresme V (4.90 ppm); וגם Rumford, Davisson, Finsen ("נקודות חמות", Moriarty et al. 2021)
קואורדינטות מאומתות	Birkeland 30.17° דרום 174.01° מזרח; Oresme V 40.75° דרום 165.39° מזרח; Dewar 2.61° דרום 165.62° מזרח (54.6° מן המרכז, מחוץ לשפה)

בדיקה: בטבלת 43 המכתשים, 32/34 אושרו; המרחק של Birkeland, 25.98°, אושר. הקוד המלא של הניתוח החיצוני לא הורץ כאן מחדש (קובצי הגלם חסרים).

שלושה מכל ארבעה מכתשים בסהר עומדים מעל 3 ppm, בפנים ובחוץ כאחד, פי כמה מן ה-0.54–0.68 ppm של אזורי ההשוואה של Dewar. B7 שוכן הרחק מחוץ לשפה, ולהלן הוא מטופל כמקור נפרד.

מדוע הल्בה הקבורה מרוכזת דווקא במעגל המרכזי? מדוע התוריום שוכן בסהר בצד אחד, מערב וצפון-מערב, ונחלש עם המרחק? ומדוע הल्בה ב-SPA משתרעת על פני כ-1.5 מיליארד שנה, ממקורות שונים, בכמויות קטנות?

STEP 3 מה המדע אומר

לבה קבורה היא געשיות עתיקה שכוסתה בחומר נזרק של פגיעות מאוחרות (Whitten & Head 2015); במרכז SPA מרבצים נרחבים מתפרשים כלבה קבורה (Wang et al. 2024; Chuang et al. 2025). סהר התוריום הוא חשיפה של מעטפת עליונה שכבתית או של שארית אגם ההתכה, שנחפרה מחדש בידי מכתשים צעירים (Moriarty et al. 2021; Wang et al. 2026). הגעשיות בצד הרחוק נמשכה 1.4 מיליארד שנה לפחות, ממקורות מאגמה שונים, ודעכה ככל שמקורות החום הפנימיים נחלשו (Li et al. 2024).

STEP 4 היכן המדע אינו מספיק

עקבי: קיומה של לבה קבורה, וגעשיות ארוכה שדועכת.

לא נובא מראש: הסהר החד-צדדי, בכיוון אחד, מערב וצפון-מערב, הנחלש עם המרחק מן המרכז. בהסבר המקובל הוא שכבה שנחשפה במקום מסוים; הכיוון עצמו אינו נגזר ממנגנון. איור B9.3 מוסיף נקודה שנייה: שכבה שנחפרה מחדש בידי מכתשים צעירים הייתה צריכה להיות עשירה יותר בתוך המכתשים מאשר סביבם, והמדידה מוצאת את השניים שווים.

הכרעת המדע: מסביר

לבה קבורה, געשיות ארוכה ודועכת ושכבה חשופה עשירה בתוריום מוסברות כולן בקריאה המקובלת.

STEP 5 מה המודל אומר

הברנר ויציאותיו. הברנרים הם Imbrium (עיקרי) ו-Serenitatis (משני), בצד הקרוב. יציאותיהם בצד הרחוק נמצאות ב-37.6° דרום, 160.0° מזרח (ליד Ingenii) וב-27.3° דרום, 198.4° מזרח (צפון SPA, ליד Oppenheimer ו-Apollo). "הנקודה האסטרטגית" והים המרכזי שוכנים באזור המרכזי שמדרום ליציאות (מרכז הכיפה 51.4° דרום, 196.8° מזרח; הרשומה החלשה ביותר של איור B3.2, 47.5° דרום, 193.5° מזרח, על קרקע שהוסרו ממנה הפתחים ומישורי הल्בה — המינימום של B1e, על קרקע שנוקתה גם מן ההילות, הוא 45.4° דרום, 197.9° מזרח). מתחת לכל יציאה יש כיפה קטנה של קרום דק (Apollo; Ingenii). ימות פעילים פלטו חומר שנחת סביבם ויצר מכתשים: מול היציאות יש כ-220 מכתשים למיליון קמ"ר, בנקודה החלשה היא 90 (111 במינימום של B1e; Oppenheimer), פתח געשי עם מרבצים פירוקלסטיים, נמצא 8.9° מציאת Serenitatis. הנקודה האסטרטגית היא המקום שבו חום הברנרים נשמר הכי הרבה זמן; היא מוגדרת להלן. מרבצים פירוקלסטיים הם שבירי התכה שנזרקו בידי גז בורח, הסימן של פתח נפיצי.

הים המרכזי. בתחילה החזיקה הכיפה, בין 0° ל-15°, ים גדול, רגיל וסוער: הפתח. דרכו נפלט חומר שנחת במקומות שונים, לא בהכרח חזרה בתוכו. החום האזורי, שהאגס מיקד שם, התיך את גבולותיו, והוא הותך יחד עם כל SPA בדרגות שונות. בסדרה, ים הוא פתח מעל כיפת הזנה (מאמר 5): פי פתח שדרכו עלתה התכה ודרכו נזרק חומר. האגס הוא הקצה המוארך של כדור הארץ שעליו ישב הירח בזמן שהיה מחובר; הוא הוביל את החום אל הברנר.

הल्בה הקבורה היא הים עצמו. בתוך המעגל של 15° אנו רואים את הल्בה הקבורה, וזהו אכן הים שנקבר, זה שפלט. שאר SPA עבר התכה בלי לבה; רק הים, ששכב בפני השטח, היה לבה, וחלק ממנו נקבר. הדבר הופך

את המדידה של STEP 1 למבחן: המודל מיקם את הים במעגל של 15° מן הכיפה, והלבה הקבורה נמצאה במעגל הזה וכמעט בשום מקום אחר.

הסהר הוא מה שהים פלט, שנפל מאחור לצד אחד. החומר עלה ונפל מאחור אל הצד המערבי של הים. הנקודות החמות הן מקומות שבהם חומר נפל ישירות. Dewar, אגם לבה קבור מחוץ לשפה, הוא מקור בלתי תלוי. כיסוי שנפל מלמעלה מסביר את התוצאה של איור B9.3: התוריום שוכן על פני השטח, זהה בתוך המכתשים ומחוצה להם, ומידלדל עם המרחק מן הים שפלט אותו.

התוריום עזב את המרכז עם הנוזל. כפי שהוצג ב-B7, הייתה זרימה לעבר הסהר, לא רק חומר נזרק, והיא הוסטה בידי הסיבוב. תוריום כמעט אינו מתאדה, אבל הוא "בורח" אל הנוזל: בהתכה חלקית הוא עובר כמעט כולו אל ההתכה. במרכז, היכן שהחום היה החזק ביותר, נוצר הכי הרבה נוזל; הנוזל זרם החוצה, הוסט לעבר צד הסהר ונשא איתו את התוריום. במרכז נשארה שארית מדולדלת (1.7 ppm), ובסהר הצטבר נוזל מועשר (4–5 ppm בנקודות החמות). בקצה הרחוק, כשהירח מחובר, כוח הסיבוב הפועל על זרימה רחבה ואיטית במדרון מתון הוא מאותו סדר גודל כמו כוח המדרון. הזרימה החוצה של התוריום והדמיית הסהר שלהלן נשמרות, ומרכז הכובד של מכתשי התוריום, 6.6° מציאת Imbrium, נשמר כתצפית. שתי הדרכים, דרך האוויר ועל פני הקרקע, פועלות באותו כיוון, משום שאותו סיבוב מסיט את שתיהן לאותו צד.

קצב הסיבוב מן הסהר. מן הסהר אפשר להסיק את קצב הסיבוב של כדור הארץ. חומר שנזרק מגוף מסתובב נופל מאחור ביחס לסיבוב. הסיבה זהה לזו של מחליקה הפותחת את ידיה ומאטה: חומר שנזרק החוצה, הרחק ממרכז הסיבוב, שומר על התנע הזוויתי שלו, ולכן במרחקו הגדול יותר הוא סב לאט יותר מן הקרקע שעזב, והקרקע מקדימה אותו מתחתיו. הוא נוחת מאחורי נקודת המוצא שלו, בצד המאסף. כשהירח מחובר, הכבידה האפקטיבית בקצה הרחוק כמעט מתבטלת, החומר נשאר באוויר כ-35–40 דקות, והסיבוב מסיט את כולו לצד אחד. הקצה הרחוק שכב מעבר לקו הקורוטציה (המרחק שבו גוף שמסתובב עם כדור הארץ כבר נע במהירות של מסלול חופשי), שם הדחיפה החוצה של הסיבוב גוברת על משיכת כדור הארץ; העודף הזה מושך הרחק מן הירח ופועל נגד הכבידה של הירח עצמו, כך שחומר נזרק נופל חזרה רק לאט. ככל שהמעוף ארוך יותר, הקרקע מסתובבת מתחתיו יותר, והנחיתה חד-צדדית יותר. בעת הניתוק הירח היה עגול והחלק החיצוני שלו קשיח; בזמן הפליטות הוא עדיין היה מוארך לעבר כדור הארץ.

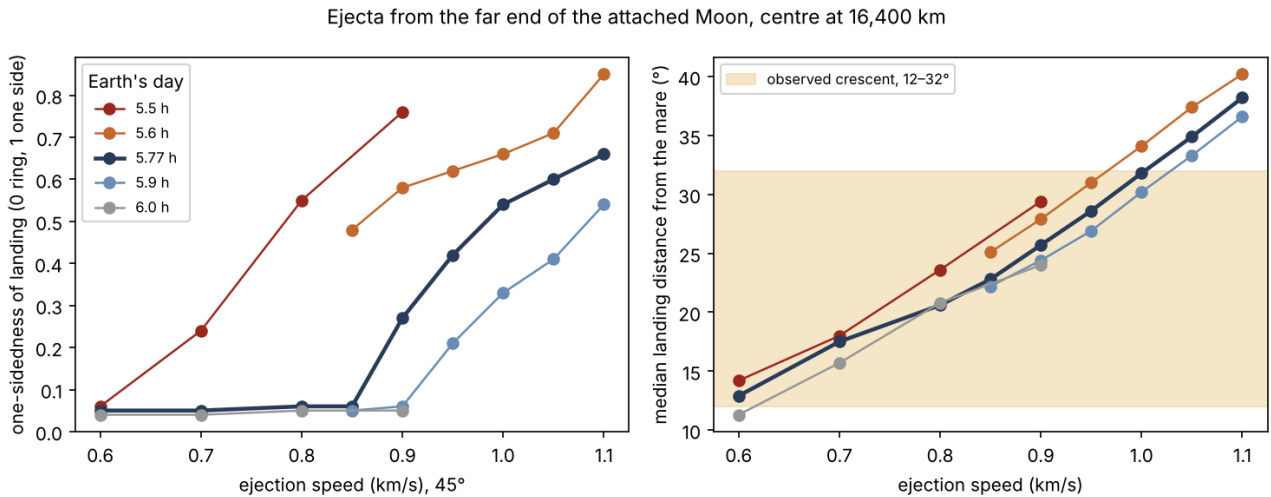
שני שלבים. בזמן שהירח היה מחובר והסיבוב מהיר: פליטה חזקה, הסהר והלבה הקבורה. לאחר הניתוק: הלחץ של כדור הארץ כבר לא הגיע אל הירח, ואיתו פסקו הפליטות; הים נרגע, נשאר חם וקפא לאט במקומו, והגילים המתוארכים של 2.2–3.7 מיליארד שנה מתעדים את הקפיאה האיטית הזאת של מה שנשאר שם. לכן אין סהר מאותו זמן: לאחר השחרור הירח כבר לא סב עם היום המהיר של כדור הארץ, הקצה הרחוק שלו כבר לא שכב מעבר לקו הקורוטציה, ולא נזרק דבר שיוסט הצידה.

הנקודה האסטרטגית. הברנר פעל לפני הניתוק, מכדור הארץ, דרך הזרם לאורך האגס. הנקודה האסטרטגית היא המקום שבו החום שלו נשמר הכי הרבה זמן (קרום דק, פתחים קיימים וחום שנאגר); לאחר הניתוק היא קפאה אחרונה, ולכן הגילים הצעירים ביותר נמצאים בה. גם הלבה שקפאה מאחור היא "לבה מכדור הארץ": המעטפת של הירח היא חומר של כדור הארץ (מאמר 3, C.10). כמו סיר מרק סמיך שהורד מן האש ונשאר חם הכי הרבה זמן במרכזו, המקום שבו החום נאגר הוא האחרון להתקשות.

מעט לבה, ונמדדה הצעירה ביותר. כתמי הלבה הגלויה מעטים וקטנים: כמות נמוכה של לבה שהתפרצה. הגיל שנמדד במעבדה הוא של הלבה האחרונה באתר אחד, ולבות עתיקות יותר שוכנות לצדה. דגימה שנגרפה מפני השטח לוקחת את השכבה העליונה, שהיא האחרונה שזרמה; הגיל של 2.8 מיליארד שנה מתארך את סוף הפעילות באותו מקום, לא את תחילתה.

ההדמיה: הסהר כמצפן לסיבוב. אם הסהר הוא חומר שנפל מאחור ביחס לסיבוב, מרחקו וחד-צדדיותו תלויים במהירות שבה סב כדור הארץ. ההדמיה שואלת אם היום של מצב השחרור של הסדרה נותן סהר במקום

שנצפה. חומר נזרק בזווית של 45° מן הקצה הרחוק של הירח המחובר (רדיוס 1,890 ק"מ), שמרכזו על קו הקורטוציה של מצב השחרור של הסדרה, 16,400 ק"מ ממרכז כדור הארץ, עם יום ארצי של 5.77 שעות (מאמר B.18, 2); הירח סב עם כדור הארץ. כל הרצה זורקת 72 חבילות לכל כיווני המצפן ורושמת היכן הן נוחתות. **קו הקורטוציה** הוא המרחק שבו מסלול חופשי נמשך בדיוק יום ארצי אחד; גוף שם הסב עם כדור הארץ נע במהירות מסלולית. שבעים ושתיים חבילות, אחת בכל 5° , מכסות כל כיוון באופן שווה, כך שכל חוסר סימטריה במקום הנחיתה בא מן הסיבוב ולא מן הזריקה.



איור B9.4. חומר נפלט מן הקצה הרחוק של הירח המחובר, המרכז ב-16,400 ק"מ: חד-צדדיות הנחיתה (0 = טבעת, 1 = צד אחד; משמאל) ומרחק הנחיתה החציוני מן הים (מימין), מול מהירות הפליטה, לימים ארציים של 5.5–6.0 שעות. מוצלל: הסהר שנצפה, 12° – 32° מן המרכז.

כל עקומה היא אורך אחד של היום הארצי. משמאל, החד-צדדיות נשארת קרובה לאפס במהירויות נמוכות, שבהן החבילות נופלות חזרה בטבעת שווה, ומטפסת ככל שהמהירות גדלה והמעוף מתארך. מימין, מרחק הנחיתה גדל עם המהירות. סהר כמו זה שנצפה דורש את שניהם בבת אחת: נחיתה חד-צדדית בבירור ומרחק בתוך הרצועה המוצללת.

מהירות הפליטה	מה קורה ב-5.77 שעות
0.85–0.6 ק"מ/ש'	טבעת סימטרית, 13° – 23° מן הים
0.9 ק"מ/ש'	הטבעת מתחילה להיעשות חד-צדדית (0.27); שני שלישים בצד המאסף
1.0–0.95 ק"מ/ש'	סהר: חד-צדדיות 0.42–0.54, 74%–96% בצד המאסף, 29° – 32° מן הים
1.1–1.05 ק"מ/ש'	סהר, 35° – 38° מן הים, מעבר לזה שנצפה

ביום מהיר יותר (5.5–5.6 שעות) הסהר נוצר במהירויות נמוכות יותר, 0.8–0.9 ק"מ/ש', 24° – 29° מן הים; ב-6.0 שעות ובימים איטיים יותר הוא אינו נוצר בטווח שנבדק. קוד: `sim577.py`, תיקייה 10-14, `B9_crescent_5.77h_2026`.

הטבלה עוקבת אחר היום של מצב השחרור, 5.77 שעות, ככל שהזריקה מתחזקת. זריקות איטיות נוחתות בטבעת שווה; מ-0.9 ק"מ/ש' הטבעת מתחילה לנטות; ב-1.0–0.95 ק"מ/ש' רוב החומר נוחת בצד המאסף, בסהר במרחק שנצפה; זריקות מהירות עוד יותר נושאות אותו אל מעבר לרצועה שנצפתה. כדור ארץ מהיר יותר מסובב את הקרקע יותר במהלך כל מעוף, ולכן הסהר מופיע במהירויות נמוכות יותר; כדור ארץ איטי יותר מסובב אותה מספיק.

הסהר נוצר במצב השחרור של הסדרה: ב-5.77 שעות החומר שנזרק בכ-1 ק"מ/ש' נופל בצד אחד, הצד המאסף, בחלק החיצוני של הסהר שנצפה.

STEP 6 כיצד זה מתאים למודל

מה נמצא	המודל אומר
הלבה הקבורה שוכנת כמעט כולה בתוך המעגל של 15° (13.6%–24.1% ממנו) ✓	הים המרכזי בכיפה, 15° – 0°
לבה גלויה וקבורה מרוכזת במרכז; כמעט אין מחוצה לו ✓	הים היה לבה; שאר SPA התכה בלי לבה
המרכז מדולדל (1.7 ppm), הסהר מועשר (4–5 ppm) ✓	זרימת נוזל, שהוסטה בידי הסיבוב, נשאה גם היא תוריום אל הסהר
תוריום בצד אחד, מערב וצפון-מערב; שכבה (בפנים = בחוץ), נחלשת עם המרחק ($r = -0.53$) ✓	הסהר הוא חומר נפלט שנפל מאחור לצד אחד
בהדמיה, במצב השחרור של הסדרה (5.77 שעות, 16,400 ק"מ), סהר לפליטה ב-0.95–1.0 ק"מ/ש', נחיתה 29° – 32° מן הים, בשוליים החיצוניים של הסהר האמיתי (12° – 32°) ✓	סהר רק בזמן שהירח מחובר ומסתובב מהר
הלבה הגלויה שוכנת במרכז ומצפון לו, לא בסהר ✓	לאחר השחרור אין פליטה, ולכן אין סהר מאותו זמן
כ-4.2 מיליארד שנה (מקור אחד) $\leftarrow 3.2$ – 3.6 (שיא) $\leftarrow -2.8$ 2.2 (אחרון, מקור אחר); מרבצים קטנים ✓	פליטה בזמן החיבור; לאחר השחרור הים קפא לאט במקומו

השורות עוקבות אחר הסיפור לפי הסדר: היכן היה הים, מה הוא זרק, כיצד החומר הנזרק והנוזל הזורם החוצה הוסטו לצד אחד, וכיצד הים נרגע וקפא לאט לאחר השחרור.

הכרעת המודל: מתאים

הלבה הקבורה שוכנת במעגל הים המרכזי, לסהר התוריום יש הכיוון החד-צדדי שסיבוב מהיר של הירח המחובר נותן לחומר נפלט, וגילי הלבה מתעדים את הקפיאה האיטית של חום שנשמר זמן רב במרכז.

מה זה מראה. הים המרכזי הסוער, שהותך בדרגות שונות, מאחד את B1, B6, B7, B8 ו-B9 לחשבון אחד: פתח שפלט, הותך ונקבר, והוא המבנה מן המרכז החוצה החוזר בכל מדידה. הוא הופך ממצא של הספרות (לבה קבורה במרכז) לניבוי שהתממש: הלבה הקבורה שוכנת בדיוק במעגל הים. ההיגררות לאחור של החומר הנפלט נותנת מנגנון לכיוון החד-צדדי של התוריום, שהקריאה המקובלת אינה גוזרת.

הסהר גם נותן מבחן חדש ובלתי תלוי: במצב השחרור של הסדרה (5.77 שעות) הוא נוצר לפליטה בכ-1 ק"מ/ש', ויום מהיר יותר יוצר אותו במהירויות נמוכות יותר; הוא מקשר את SPA למאמר 2. ההתארכות לעבר כדור הארץ בזמן הפליטות מצדיקה ירח מעוגל סביב הים בהדמיה. שני השלבים, מחובר ומהיר ואחר כך חופשי ורגוע, מסבירים מדוע המרבצים הצעירים לא יצרו סהר, ניבוי שהמפה מאששת. הנקודה האסטרטגית מסבירה מדוע הגילים הצעירים ביותר נמצאים באותו מקום: שם החום נשמר הכי הרבה זמן וקפא אחרון, בלי ברנר שני לאחר הניתוק (קישור ל-B15). מעט לבה, כשהצעירה ביותר היא שנמדדה, מצביעים על הגילים מרחוק (2.2–3.7 מיליארד שנה) ועל השבר בן 4.2 מיליארד השנים כלבה של זמן הברנר. מבחן מקור המכתשים, החל על כל הימות, עובר למאמרים 6 ו-7.

מה יש בידינו עכשיו. B8, B7, B9 יוצרים עכשיו חשבון אחד של הרצפה. חום הברנרים, שהצטבר מתחת למרכז, חימם את האגן כולו והתיך אותו מלמטה (B8, B7); רק במרכזו העלה פתח, הים המרכזי, לבה אל פני

השטח. בזמן שהירח היה מחובר וסב מהר, הים הזה זרק חומר שנפל מאחור ביחס לסיבוב אל סהר התורים, ונוזל שעזב את המרכז הוסט באותו כיוון. החום התיך אחר כך את הים וקבר אותו, וזו הלבה המוסתרת של המעגל המרכזי. לאחר השחרור הים נרגע: הוא נשאר חם וקפא לאט במקומו, בלי סהר.

נתונים וקוד.

נתונים	מקור
לבה קבורה במרכז SPA	Wang et al. (2024), JGR Planets zenodo.8435503 ;(doi:10.1029/2023JE008176)
לבה קבורה, סקירות	Whitten & Head (2015), Icarus (doi:10.1016/j.icarus.2014.09.031); Chuang et al. (2025), PSJ (doi:10.3847/PSJ/ada4a6)
מכתשי הילה כהה	Izquierdo et al. (2024) (doi:10.1029/2023JE007867); zenodo.7823630
לבה גלויה, גילים ונפחים	Pasckert et al. (2018), Icarus (doi:10.1016/j.icarus.2017.07.023)
בזלת של 4.2 ו-2.8 מיליארד שנה	Zhang et al. (2025b), Nature (Chang'e-6); Cui et al. (2024), Science (doi:10.1126/science.adt1093)
תורים	Moriarty et al. (2021) (doi:10.1029/2020JE006589); ,Wang et al. (2026), EPSC2026-624; Lunar Prospector מוצר של חצי מעלה
מכתשים	Robbins (2019) (doi:10.1029/2018JE005592); IAU/USGS
שרידות חומר הגוף הפוגע (ספרות)	Avdellidou et al. (2016) (doi:10.1093/mnras/stv2844); Zhu et al. (2019) (doi:10.1038/s41586-019-1359-0)
ניתוח וקוד	,all_craters.py ,analysis.py ,sim2.py ודוח הניתוח; all_crater_apertures.csv sim577.py (הדמיית הסהר)

פתוח. יש לחזור על הדמיית הסהר באופן בלתי תלוי, עם ירח מוארך לעבר כדור הארץ, כפי שהיה בזמן הפליטות, טווח של זוויות, ומרכז הירח מתחת לקו הקורטציה, כפי שהיה לפני השחרור. יש למדוד את גיל הלבה הקבורה במעגל המרכזי: האם היא עתיקה כמו זמן הברנר? הסהר מסמן את הצד המאסף של אותו זמן, ויש להשוותו למערכת הצירים של אותו זמן (עבודה עתידית). מבחן מקור המכתשים ייושם על מקרה נקי (Dionysius, Mare Tranquillitatis) במאמרים 6 ו-7.

B10 המסה הצפופה

בקצרה. מתחת לחציו הדרומי של אזור הים, בעומק, יש עודף מסה של 2.18×10^{18} ק"ג לפחות, הפרוס על פני כ-700×850 ק"מ. במודל: חומר נושא ברזל מכדור הארץ הגיע אל בסיס SPA, כפי שהגיע למקומות רבים בירח; SPA לא היה ים פעיל: שום חומר לא הובא דרכו מלמטה, ולכן לא היה מנגנון שבו משהו ישקע. החומר שהיה במקום חומם, התבשל והשתנה; כשהחום גירש חומרים אחרים, הברזל שנותר התרכז באזור הים, והוא קפא במקומו כשהאזור התקרר.

סעיפים B1–B9 קראו את פני השטח של SPA: את המכתשים שלו, את צורתו, את הקרום שלו ואת הלבה שלו. סעיפים B10–B14 יורדים אל מתחת לפני השטח, אל מה שהמעטפת שמתחת לאגן מכילה ואל מה שהדגימות שלו עשויות ממנו: מסה כבדה הנראית בכבידה (B10), מעטפת שאיבדה את היסודות הנדיפים שלה (B11), מעטפת ענייה בחמצן (B12), מקור לבה שנשטף (B13), וגרגירי מתכת בתוך הדגימות העתיקות ביותר שתוארכו (B14). חמשתם נקראים יחד, משום שבמודל הם מעשה ידיו של מקור חום אחד ושל אספקה אחת של ברזל מכדור הארץ. *אזור הים שמשמש לאורך כל הסעיפים הוא המעגל של 15° סביב מרכז הכיפה (51.4° דרום, 196.8° מזרח), שבו שכן הים המרכזי (B9).*

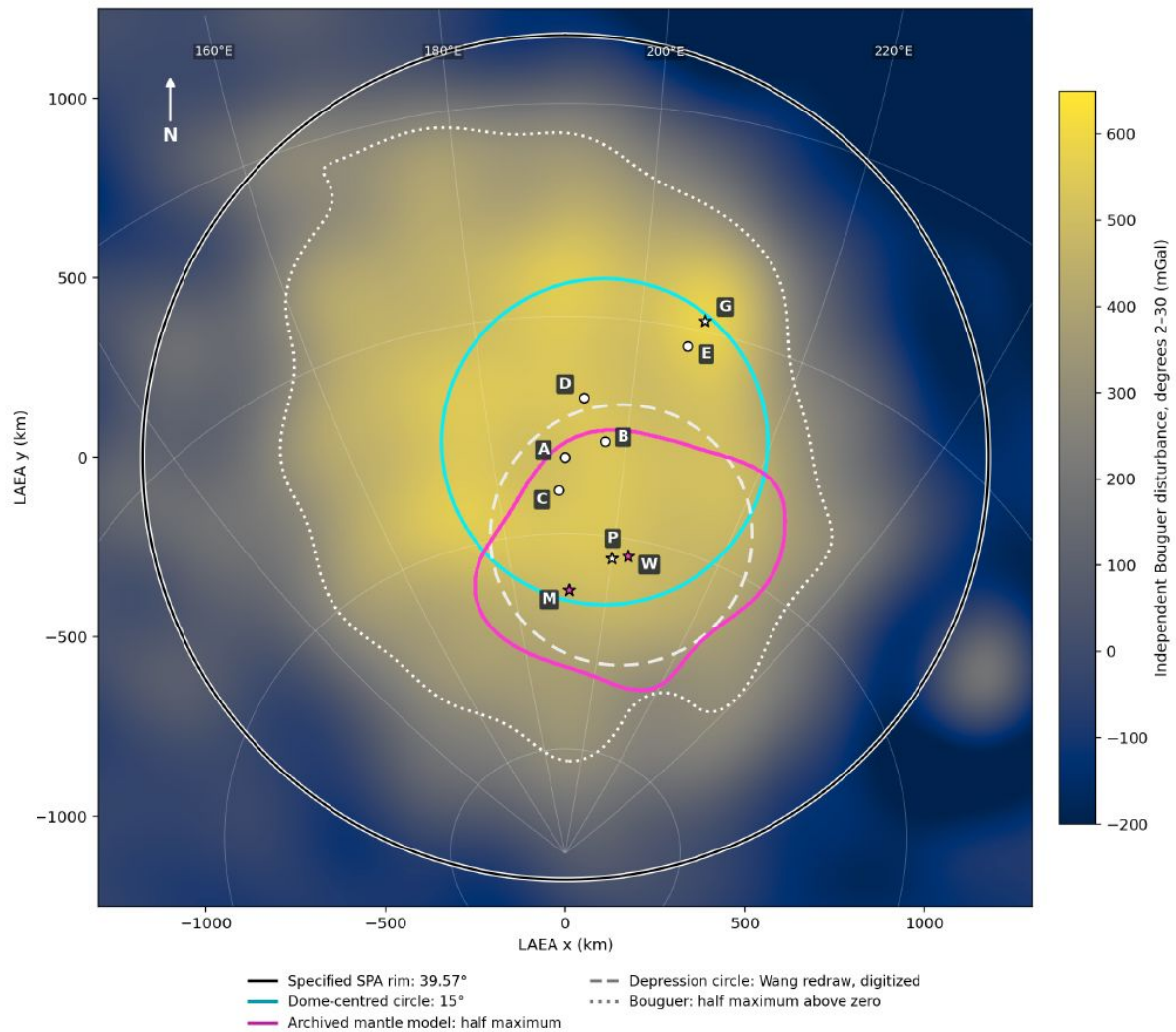
STEP 1 האנומליה

כיצד רואים מסה נסתרת. חללית במסלול נמשכת מעט חזק יותר מעל מקומות שיש מתחתם יותר מסה. שתי חלליות GRAIL טסו זו אחר זו ומדדו את המרחק המשתנה ביניהן; ממנו ממופה שדה הכבידה של הירח כולו. חלק מן השדה הזה נובע פשוט מצורת פני השטח — הר מושך, שקע מושך פחות — ו-LOLA, מד הגובה בלייזר של Lunar Reconnaissance Orbiter, נותן את הצורה הזאת. לאחר שמסירים את השפעת הטופוגרפיה הנראית, מה שנשאר הוא הכבידה של מה שנמצא בפנים: קרום דק יותר או עבה יותר, וחומר צפוף יותר או קל יותר במעטפת. השארית הזאת היא אנומליית Bouguer (כאן, הפרעת Bouguer).

James et al. (2019), מכבידת GRAIL ומטופוגרפיית LOLA, מצאו עודף צפיפות מפוזר במעטפת שמתחת ל-SPA של 2.18×10^{18} ק"ג לפחות; החסם התחתון המועדף במודל שלהם נמצא עמוק יותר מ-300 ק"מ (זה אינו העומק הממוצע). המודל המקורי והנתונים שלהם שמורים בארכיון Zenodo (doi:10.5281/zenodo.2551813). כבידה הנמדדת ממסלול אומרת כמה מסה עודפת יש ובערך היכן, אך אינה יכולה לקבוע את העומק באופן חד-ערכי: אותה משיכה לבוא מעודף קטן יותר קרוב לפני השטח או מעודף גדול יותר עמוק יותר, ולכן התוצאה מוצגת כחסם תחתון וכטווח של עומקים. ניתחנו את מיקומה ואת גודלה מול נקודות הייחוס של מאמר זה (איור B10.1 והטבלה שלהלן).

SPA: deep-mantle model versus Bouguer gravity

Lambert azimuthal equal-area • centre 53°S, 191°E • lunar radius 1,737.4 km



A SPA centre B Dome C Thin-crust centre D Crater-deficit minimum E Chang'e-6
P Published approximate centre M Archived model peak W Half-max mass centroid G Bouguer peak

The dashed depression circle is a digitization of Wang et al. (2024) Fig. 3b, citing James et al. (2019).

איור 10.1B. המסה העמוקה בתוך SPA (היטל למברט אזימוטלי שווה-שטח שמרכזו ב-53° דרום, 191° מזרח; ברקע: הפרעת Bouguer בלתי תלויה, דרגות 2–30). מג'נטה: המסה העמוקה של מודל המעטפת השמור בארכיון של James et al. (2019), בקו מתאר בחצי מערכה המרבי. ציאן: אזור הים, מעגל של 15° סביב מרכז הכיפה. לבן מקווקו: השקע בפני השטח שסימנו James et al. (2019), כפי ששורטט מחדש בידי Wang et al. (2024), הומר לדיגיטלי בדיוק של $\pm 1^\circ$. לבן מנוקד: עורך הכבידה הכולל (חצי מן המרבי מעל אפס), כולל הקרום. A: מרכז SPA; B: מרכז הכיפה; C: מרכז הקרום הדק; D: מינימום חוסר המכתשים; E: Chang'e-6; P, M, W: שלוש הגדרות של מרכז המסה (המרכז שפורסם, שיא המודל השמור, מרכז הכובד של אזור חצי המרבי); G: שיא הכבידה הכוללת (לעבר Apollo — לא של המסה העמוקה).

המפה משורטטת כך ששטחים שווים על הירח נראים כשטחים שווים על הדף, ולכן אפשר להשוות ישירות את גודלי קווי המתאר. "דרגות 2–30" פירושו שנשמר רק החלק הרחב של שדה הכבידה, מבנים של מאות קילומטרים ויותר, שהוא קנה המידה של מסה עמוקה; הפרטים הדקים שמקורם בקרום הושמטו. "חצי מרבי" הוא קו המתאר המשורטט במקום שבו העודף יורד למחצית מערך השיא שלו: הוא מסמן את גוף המסה העיקרי בלי שוליה החלשים. על מה להסתכל: קו המתאר במג'נטה (המסה העמוקה) יושב בתוך המעגל בציאן (אזור הים), בצדו הדרומי, ושלושת הסימנים P, M ו-W למרכזה נמצאים כולם מדרום ל-B, מרכז הכיפה. שיא הכבידה הכוללת, G, נמצא במקום אחר, לעבר Apollo; הוא כולל את הקרום ואינו המסה העמוקה.

הגדרה	מיקום	ממרכז הכיפה
המרכז שפורסם	62° דרום, 200° מזרח	10.7° (326 ק"מ), דרומה
שיא המודל המקורי	65.2° דרום, 191.9° מזרח	14.0° (425 ק"מ), דרומה
מרכז הכובד של אזור חצי המרבי	61.6° דרום, 203.2° מזרח	דרומה
היקף (חצי מרבי)	כ-444,500 קמ"ר; רדיוס שקול כ-377 ק"מ (12.4°); 50–73.5° דרום	

כל ההגדרות של המרכז נופלות בתוך המעגל של 15°, בצדו הדרומי. המסה רחבה ומפוזרת, לא גוש. אם היא מתכת, היא שקולה לכדור שקוטרו כ-95 ק"מ; הכבידה לבדה אינה מבחינה בין מתכת לתחמוצות. בדיקה: המרחק ממרכז הכיפה אל המרכז שפורסם הוא 10.7° ✓.

הטבלה נותנת את מרכז המסה בשלוש דרכים, משום שלמסה רחבה ומרוחה אין מרכז אחד מובן מאליה: המרכז שנמסר בפרסום, הנקודה החזקה ביותר של המודל השמור, ומרכז הכובד של השטח שבתוך קו המתאר של חצי המרבי. בכל אחת מהן התשובה זהה: המרכז נמצא 10.7°–14.0° מדרום למרכז הכיפה, בתוך המעגל של 15°. השורה האחרונה נותנת את הגודל. שטח של כ-444,500 קמ"ר הוא שטחו של עיגול ברדיוס כ-377 ק"מ, או 12.4° של קשת על הירח — קרוב לרדיוס של 15° של אזור הים. ההערה שמתחת לטבלה נותנת תחושה של קנה מידה: אילו נדחס כולו למתכת טהורה, העודף כולו היה ממלא כדור שקוטרו כ-95 ק"מ בלבד; פרוס כפי שהוא, זהו עודף דק על פני נפח רחב מאוד.

STEP 2 החידה

מהו החומר הכבד הזה, כיצד הגיע לעומק הזה, מדוע נעצר שם ולא שקע אל הליבה, ומדוע הוא שוכן מתחת לחציו הדרומי של אזור הים?

STEP 3 מה המדע אומר

או מתכת מליבת הגוף הפוגע, שהתפזרה במעטפת ונשארה מרחפת בה; או תחמוצות צפופות מן השלב האחרון של התגבשות אוקיינוס המאגמה — אף שהריכוז מתחת ל-SPA טרם הוסבר (James et al. 2019). הקריאה הראשונה הולכת בעקבות מודל הפגיעה: גוף בעל ליבת ברזל פגע, וחלק מן הברזל שלו התערבב במעטפת הירח. הקריאה השנייה שייכת להתקררות הירח הקדום: כששכבה גלובלית של התכה (אוקיינוס המאגמה) התגבשה, המינרלים האחרונים שנוצרו היו עשירים בברזל ובטיטניום, ולכן כבדים.

STEP 4 היכן המדע נופל

מתיישב: חומר כבד שנשאר מרחף במעטפת קשיחה. אינו מתיישב: המקור תלוי בגוף פוגע בעל ליבה; בהסבר התחמוצות הריכוז מתחת ל-SPA נשאר פתוח; המיקום בחצי הדרומי אינו נגזר.

הכרעת המדע: מסביר בחלקו

המדע מסביר חומר צפוף המוחזק במעטפת קשיחה, אבל מקורו תלוי בגוף פוגע בעל ליבה או משאיר את הריכוז מתחת ל-SPA פתוח, והמיקום הדרומי אינו נגזר.

STEP 5 מה המודל אומר

התרכז במקומו, וקפא. SPA לא היה ים פעיל (B17). שום דבר לא הובא דרכו מלמטה: שום זרם לא נשא חומר מעלה והניח לו לשקוע חזרה, ולכן לא היה מנגנון שבו משהו ישקע. החומר שהיה במקום יכול היה רק להתחמם, להתבשל ולהשתנות; היה חימום, ואחריו קירור. החום הממושך גירש חומר נדיף וגם חומר פחות נדיף (B11,

(B12); הברזל לא עזב, וכשהחומרים האחרים עזבו, הברזל שנותר התרכז. כשהחום נרגע והאזור התקרר, הריכוז קפא במקומו. התמונה היא רוטב שמצמצמים על אש קטנה: המים עוזבים, דבר אינו מתווסף, ומה שנשאר בסיר צפוף יותר משהיה.

המקור הוא ברזל מכדור הארץ. באותו זמן לכדור הארץ לא הייתה ממש מעטפת ולא ממש ליבה; פנימו היה מעורב למדי, וחומר נושא ברזל עלה עם הזרם לאורך האגס למקומות רבים בירח, ובהם בסיס SPA (מאמר 3, B12; C.10).

מפוזר, לא מכונס. החומר אינו מתכנס לגוף אחד; הוא נפרס על פני שטח רחב. זה מה שהכבידה מראה: עודף צפיפות רחב, לא גוש קומפקטי.

נוצר באזור הים, בצדו הדרומי. הקטרים דומים: רדיוס המסה כ- 12.4° , לעומת 15° לאזור הים. כל הגדרה של מרכז נמצאת 10.7° – 14.0° דרומית למרכז הכיפה, בתוך המעגל של 15° , בצד הדק של האזור (B4, B5), והקרום הדק ביותר והקרקע הנמוכה ביותר של SPA נמצאים בתוך כ-230 ק"מ ממנה (B2, B3). המסה לא נעה כדי להגיע לשם; היא נוצרה במקום שבו החומר נושא הברזל שכב בבסיס האזור. מדוע המקום הזה נמצא בצד הדרומי נשאר כאן פתוח.

נבדק ונדחה. שני גורמים למיקום הדרומי נבחנו והונחו בצד. הגאות של כדור הארץ, בזמן שהירח היה מחובר, הייתה מושכת צפונה, לעבר המישור — הכיוון הלא נכון. ההתעגלות של הגוף מזיזה את העומק יחד עם פני השטח: המעבר מן הצורה הפחוסה אל הכדור נושא את המסה העמוקה ואת אזור הים שמעליה יחד, ולכן אינו יכול להפריד ביניהם.

מדוע המסה נשארה במקום שבו נוצרה. התשובה של המודל אינה נשענת על קשיחות המעטפת. SPA לא היה ים פעיל: שום חומר לא הובא מלמטה, ולכן לא היה מנגנון שיכול לשאת משהו מטה; החומר שבמקום חומם, התבשל והשתנה, והברזל התרכז כשהחומרים האחרים עזבו. לכן הריכוז נשאר במקום שבו נוצר. הטבלה שלהלן נותנת את קנה המידה של שקיעה במקום שבו מנגנון כזה קיים — בים פעיל המזון מלמטה. היא שואלת כמה מהר גוף כבד היה שוקע דרך המעטפת בקשיחויות שונות. היא משתמשת בחוק Stokes, הכלל לכדור השוקע לאט דרך נוזל סמיך: מהירות השקיעה גדלה עם הפרש הצפיפות ועם ריבוע הרדיוס, וקטנה ביחס ישר לצמיגות. צמיגות, הנמדדת בפסקל-שניות (Pa s), מודדת את התנגדותו של חומר לזרימה; המעטפת המוצקה זורמת, אבל לאט מאוד, וצמיגותה תלויה מאוד בטמפרטורה — מעטפת חמה יותר רכה יותר בסדרי גודל רבים.

צמיגות המעטפת (Pa s)	גוף ברדיוס 20 ק"מ	גוף ברדיוס 50 ק"מ
10^{19} (חם)	כ-1.5 מיליון שנה	כ-250,000 שנה
10^{21}	כ-150 מיליון שנה	כ-25 מיליון שנה
10^{22}	כ-1.5 מיליארד שנה	כ-250 מיליון שנה
10^{23} (קר)	יותר מגיל הירח	כ-2.4 מיליארד שנה

הזמן לשקוע 300 ק"מ (חוק Stokes, הפרש צפיפות של 500 ק"ג/מ"ק, כבידה בעומק ≈ 1.4 מ"ש²). הזמנים חלים על גופים הנישאים בים פעיל המזון מלמטה, כמו Moscoviense (B17); מתחת ל-SPA, שלא היה ים פעיל, לא היה מנגנון לשקיעה.

את הטבלה קוראים מלמעלה למטה ככל שהמעטפת מתקררת: הצבע עובר מאדום (חם, רך) לכחול (קר, קשיח). כל צעד מטה מכפיל את הצמיגות, וזמן השקיעה גדל באותו גורם: במעטפת חמה גוף ברדיוס 50 ק"מ שוקע 300 ק"מ בתוך כרבע מיליון שנה; במעטפת קרה אותו מסע נמשך מיליארדי שנים. גוף גדול שוקע מהר יותר מגוף קטן, כפי ששתי העמודות מראות. הזמנים בטבלה חלים על ים פעיל המזון מלמטה, כמו Moscoviense (B17): שם חומר עלה ושקע חזרה, וגוף כבד הנישא בזרימה הזאת שוקע בקצב שהטבלה נותנת — מהר כל עוד המעטפת חמה, לאט משהתקררה. SPA לא היה ים כזה. דבר לא הובא דרכו מלמטה, ולכן דבר לא הועמד

בתנועה שיכולה לשקוע; החומר שבמקום חומם, התבשל והשתנה, הברזל התרכז כשהחומרים האחרים עזבו, וכשהאזור התקרר הריכוז קפא במקומו. זה ה"קפא" של המודל, והוא עונה על השאלה מדוע המסה לא הגיעה אל הליבה: ב-SPA לא היה מנגנון שייקח אותה לשם.

STEP 6 כיצד זה מתאים למודל

מה המודל אומר	מה נמצא
חומר כבד מתחת לאזור המחומם	עודף מסה מתחת ל-SPA, בתוך אזור הים ✓
נוצר באזור הים	גדלים דומים: כ-12.4° לעומת 15° ✓
מפוזר; התרכז במקומו וקפא; לא ים פעיל, ולכן אין מנגנון לשקיעה	עודף צפיפות מפוזר במעטפת, לא בליבה ✓
בצד הדק של האזור (תצפית; הסיבה פתוחה)	בחצי הדרומי — אותו צד כמו הקרום הדק והדופן המתונה (B3, B5)

טבלה: דרישות המודל מול הממצאים (B10).

כל שורה מציבה דרישה אחת של המודל לצד המדידה שעונה עליה: המקום (מתחת לאזור המחומם), הגודל (כמו אזור הים), הצורה והעומק (מפוזר, מוחזק במעטפת) והצד (דרום, עם הקרום הדק ביותר והקרע הנמוכה ביותר).

הכרעת המודל: מתאים

מסה כבדה מפוזרת מתחת לאזור הים, בגודל דומה, המוחזקת במעטפת ולא בליבה — זה מה שרצף המודל דורש: ברזל שהגיע מכדור הארץ, התרכז במקומו בחימום באזור שלא היה ים פעיל, וקפא בקירור; והיא שוכנת באותו צד כמו הקרום הדק ביותר והקרע הנמוכה ביותר.

נתונים וקוד. James et al. (2019), *GRL* 46, 5100–5106 (doi:10.1029/2019GL082252), נתונים; doi:10.5281/zenodo.2551813; Wang et al. (2024), *JGR Planets* (doi:10.1029/2023JE008176) כבידת; GRGM900C, Lemoine et al. 2014,) James et al. (2019) כפי שהשתמשו בה; GSFC מסדורת GRAIL LOLA (Smith et al. 2010, ו- (Goossens et al. 2020, דרגה 1200; doi:10.1002/2014GL060027; analyze.py, SPA_Mass_Anomaly_Report.pdf, (תיקיית הנתונים) SPA_Mass_Anomaly_Report.pdf, analyze.py; ניתוח וקוד: doi:10.1029/2010GL043751; והקוד B10_2026-10-04).

פתוח. מדוע המסה שוכנת בצד הדרומי של אזור הים, עם הקרום הדק ביותר והקרע הנמוכה ביותר, נשאר פתוח; מודל מספרי של חימום וקירור במקום מתחת ל-SPA, בלי זרם עולה, עוד צריך להיעשות.

B11 מעטפת שאיבדה את הנדיפים שלה

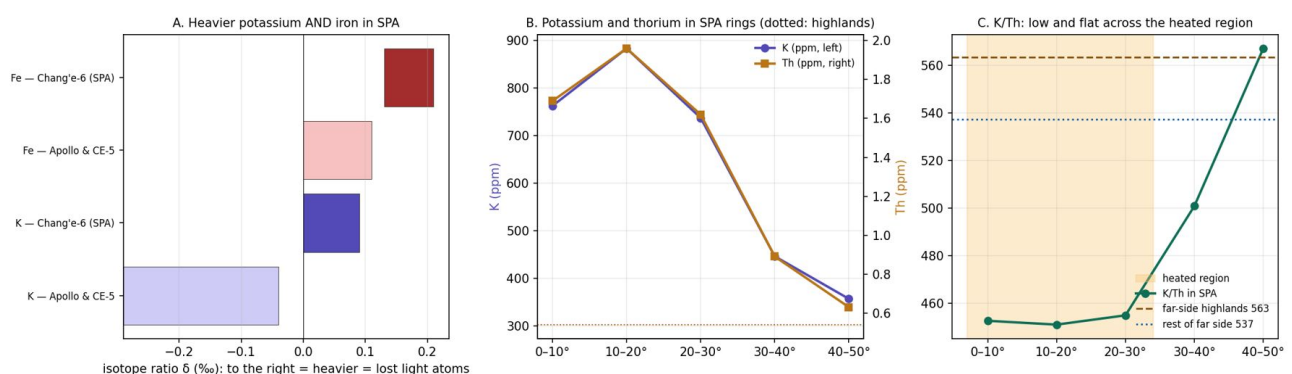
בקצרה. בכל האזור המחומם של SPA היחס בין אשלגן (נדיף במידה בינונית) לתוריום (עמיד-חום) נמוך ושטוח. בבזלות של Chang'e-6 גם האשלגן וגם הברזל כבדים איזוטופית: האטומים הקלים אבדו. ברזל מתאדה רק בחום חזק; פגיעה חמה מאוד אבל קצרה, הברנר פחות חם אבל ממושך — והוא פועל על כל האזור.

B10 מצא את החומר הכבד שהגיע לבסיס של SPA. סעיף זה שואל מה עשה החום לחומר שנשאר: מה הוא גירש.

נדיף ועמיד-חום. היסודות נבדלים במידת הקלות שבה הם עוזבים חומר כהם. מים, נתרן ואשלגן עוזבים בקלות ונקראים נדיפים (האשלגן נדיף במידה בינונית); תוריום כמעט אינו עוזב כלל ונקרא עמיד-חום (רפרקטורי). הברזל נמצא ביניהם: הוא מתאדה רק בחום חזק. אידי דורש חום, ולכן חומר שאיבד את יסודותיו הנדיפים הוא חומר שחומם.

איזוטופים כתיעוד של אידי. לרוב היסודות יש כמה איזוטופים, אטומים של אותו יסוד הנבדלים זה מזה רק מעט במשקלם. כשחומר מתאדה, האטומים הקלים בורחים מעט ביתר קלות, ולכן השארית שנותרת נעשית כבדה יותר. ההסטה נכתבת δ , בחלקי אלף (%). ביחס לתקן ייחוס: $\delta^{41}\text{K}$ משווה אשלגן-41 לאשלגן-39 הקל יותר, ו- $\delta^{56}\text{Fe}$ משווה ברזל-56 לברזל-54 הקל יותר. ערך גבוה יותר (חיובי יותר) פירושו כבד יותר איזוטופית: אטומים קלים אבדו. שני תיעודים בלתי תלויים מדברים אפוא כאן: כמה אשלגן נשאר בהשוואה לתוריום, וכמה כבדים האשלגן והברזל שנשארו.

STEP 1 האנומליה



איור 11.1B. אשלגן (סגול), ברזל (אדום), תוריום (כתום). A: איזוטופים; הגוונים הבהירים הם בזלות הצד הקרוב (Apollo), Chang'e-5), הגוונים הכהים הם (SPA (Chang'e-6); ימינה יותר — כבד יותר. B: אשלגן ותוריום בטבעות של SPA; קו מנוקד: הרמות. C: יחס אשלגן/תוריום, נמוך ושטוח בכל האזור המחומם (מוצלל), בהשוואה לרמות של הצד הרחוק (563) ולשאר הצד הרחוק (537).

על מה להסתכל: בלוח A הנקודות הכהות (SPA) נמצאות מימין לנקודות הבהירות (הצד הקרוב) גם באשלגן וגם בברזל — דגימות SPA כבדות יותר בשניהם. בלוח C היחס נשאר ברמה נמוכה אחת מן המרכז החוצה לאורך כל האזור המחומם המוצלל, ועולה לרמת ההשוואות רק בשוליים.

מה נמדד	ערך	מקור
K/Th בטבעות 0–30°	451–455: 16%–20% מתחת לרמות (563) ולשאר הצד הרחוק (537); בשוליים	Lunar Prospector GRS (B7)
$\delta^{41}\text{K}$ בבזלות של Chang'e-6	0 עד +0.09‰ (Chang'e-5 ו-Apollo) עד -0.29‰ (-0.04‰ עד -0.29‰)	Tian et al. 2026
$\delta^{56}\text{Fe}$ באותן בזלות	0.13–0.21‰ (Chang'e-5 ו-Apollo) עד 0–0.11‰	Tian et al. 2026
הוצא מכלל אפשרות על ידי המחברים	השפעות קרינה קוסמית וחומר של גוף פוגע	Tian et al. 2026
נתרן ואשלגן בזכוכיות	התאדו והתעבו מחדש על החומר המותר	Li et al. 2026

התייבשות חריגה ב-SPA, בלי איוזטופים זרים	—	מאמר בעברית (המובאה טעונה אימות)
אתר הדגימה	כ-11.6° ממרכז הכיפה, בתוך אזור הים המרכזי; כ-210 ק"מ ממינימום המכתשים (גרסה קודמת נתנה כ-320 ק"מ, המרחק מן הנקודה החלשה של איור B3.2)	

טבלה: מה נמדד בחומר של SPA — היחס K/Th והאיוזטופים (B11).

השורה הראשונה היא המפה ממסלול: ספקטרומטר קרני הגמא (GRS) של Lunar Prospector ספר את קרני הגמא שפולטים אשלגן ותוריום בפני השטח, והיחס ביניהם הוא 455–451 בכל מקום בטווח של 30° מן המרכז — בערך שישית עד חמישית פחות מאשר בחוץ. משתמשים ביחס ולא באשלגן לבדו משום שהוא מבטל חלק גדול מן ההשפעה של פשוט יותר או פחות מאותו חומר מעורב: שני היסודות נוטים לנוע יחד בהתכות, ולכן ירידה ביחס ביניהם מצביעה על אשלגן שהוסר. שתי השורות הבאות הן הדגימות: בזלות SPA כבדות יותר באשלגן ובברזל מכל בזלת של הצד הקרוב שנמדדה. השורה הרביעית חשובה לקריאה: Tian et al. בדקו ושללו את שתי הדרכים האחרות להפוך את האיוזטופים לכבדים — חשיפה לקרינה קוסמית בפני השטח, וחומר של גוף זר. מה שנשאר הוא אידוי.

מדוע משווים למה שנמצא מחוץ ל-SPA. כדי לדעת מה היה שם לפני החימום משתמשים בשכנים: אותו ירח, אותו צד רחוק, אותו קרום עתיק — בלי הברנר. אם SPA שונה מהם, ההבדל נוצר בתוכו. יש שתי השוואות (כפי שנקבע ב-B6): הרמות ושאר הצד הרחוק. באיוזטופים ההשוואה היא לבזלות הצד הקרוב, משום ש-Chang'e-6 היא הדגימה היחידה מן הצד הרחוק. זו אינה השוואה מושלמת; השוואה נקייה תחייב בזלת מן הצד הרחוק מחוץ ל-SPA.

STEP 2 החידה

מדוע האשלגן חסר באופן אחיד ביחס לתוריום לאורך כל האזור המחומם? ומדוע גם הברזל — שמתאדה רק בחום חזק מאוד — איבד את האטומים הקלים שלו?

STEP 3 מה המדע אומר

האובדן מיוחס לאידוי במהלך הפגיעה שיצרה את SPA; במודל של Tian et al. (2026) אבדו כ-2% מן האשלגן. לאחר האידוי חלק מן האדים התעבה מחדש (Li et al. 2026).

STEP 4 היכן המדע נופל

מתיישב: אשלגן כבד פירושו אידוי. אינו מתיישב: פגיעה חמה מאוד אבל קצרה; היחס אחיד לאורך כל האזור המחומם, לא רק סביב נקודה אחת; וגם הברזל — שמתאדה רק בחום חזק וממושך — כבד. ההבדל בין שני סוגי החימום דומה להבדל בין מבער ריתוך שמועבר פעם אחת מעל מחבת לבין להבה נמוכה שנשארת מתחתיה שעות: הראשון חם יותר בשיאו, אבל השנייה מייבשת את המחבת כולה.

הכרעת המדע: מסביר בחלקו

אידוי בפגיעה מסביר אשלגן כבד, אבל אירוע קצר אינו מסביר בקלות חוסר אחיד לאורך כל האזור או ברזל כבד איוזטופית.

STEP 5 מה המודל אומר

חימום חזק, מרוכז וממושך. מים וחומרים דומים התאדו בבירור; העיקר הוא שחימום חזק, מרוכז וממושך אידה גם יסודות פחות נדיפים. מכאן שהאשלגן איבד את האטומים הקלים שלו; הברזל לא התאדה ונשאר, אבל החום הממושך לקח חלק קטן מן האטומים הקלים ביותר שלו, והברזל שנותר כבד איזוטופית. החום הממושך השפיע על הברזל, ואולי גם על חומרים אחרים, פחות נדיפים.

על פני כל האזור המחומם (B8). האגן כולו הוא אזור מחומם, ולכן היחס נמוך ושטוח לאורך כל הפנים, עם מעבר בשוליים.

בפני השטח, אידוי שיצר חללים (B6). הגזים שעזבו את החומר פתחו בו נקבוביות, הנקבוביות הגבוהה של הקרום העליון שנמצאה ב-B6.

ההתייבשות החריגה מתאימה לברנר, ולא נמצאו איזוטופים זרים.

התוריום עזב את המרכז עם ההתכה. הייתה זרימה לעבר הסהר — לא רק חומר שנרק — שהוסטה בידי הסיבוב. תוריום כמעט אינו מתאדה, אבל הוא "בורח" אל ההתכה: בהתכה חלקית כמעט כולו עובר אל החומר המותך. התכה חלקית פירושה שרק חלק מן החומר נמס, כמו כשמחממים תערובת קפואה והנוזל הראשון שמופיע נושא את החומרים שנמסים בקלות הרבה ביותר; התוריום, שהאטום הגדול שלו משתלב רע בגבישים, הולך עם הנוזל הראשון הזה. במרכז, שם החום היה החזק ביותר, נוצרה הכי הרבה התכה; ההתכה זרמה החוצה, הוסטה לעבר צד הסהר ונשארה איתה את התוריום. במרכז נשארה שארית מדולדלת (1.7 ppm), והתכה מועשרת הצטברה בסהר (4–5 ppm במוקדיו). (ppm, חלקים למיליון, הם גרמים בטון.) בקצה הרחוק, בזמן שהירח היה מחובר, הכוח הסיבובי על זרימה רחבה ואיטית על פני מדרון מתון היה מאותו סדר גודל כמו כוח המדרון; זו הסיבה שהזרימה לא רצה ישר במורד אלא התעקלה לצד אחד.

מדוע התוריום הוא המדד. האטום שלו כבד (מסה אטומית 232), אבל הוא כמעט אינו מתאדה, והוא נע עם ההתכה, לא לפי המשקל. אשלגן שהתאדה משאיר את התוריום מאחור, והיחס יורד. הברזל, לעומת זאת, נשאר במקומו והתרכז כשחומרים אחרים עזבו (B10): השניים נפרדו משום שהתנהגו בדרכים הפוכות — התוריום הלך אחרי הנוזל, הברזל נשאר במקומו.

STEP 6 כיצד זה מתאים למודל

מה המודל אומר	מה נמצא
אידוי לאורך כל האזור המחומם	455–451 K/Th בכל הפנים, 16%–20% מתחת להשוואות ✓
חימום חזק וממושך — גם הברזל	✓ Fe^{56} כבד (0.13%–0.21%) ✓
דגימות מאזור הים המרכזי	Chang'e-6 כ-11.6° ממרכז הכיפה ✓
התוריום עזב את המרכז עם ההתכה	מרכז 1.7 ppm; טבעת 10–20° 2.0 ppm; מוקדי הסהר 4–5 ppm ✓

טבלה: דרישות המודל מול הממצאים (B11).

את השורה האחרונה קוראים מימין לשמאל כדרך החוצה: התוריום עולה מ-1.7 ppm במרכז ל-2.0 ppm בטבעת של 10–20° ול-4–5 ppm במוקדי הסהר — מרכז שהתרוקן ושוליים שהתמלאו, כפי שזרימה החוצה של התכה דורשת.

חימום ממושך על פני האגן כולו נותן את החוסר האחיד באשלגן ואת האשלגן והברזל הכבדים איזוטופית, ואילו התוריום, שנישא בידי ההתכה מן המרכז אל הסהר, מתעד את הזרימה החוצה.

נתונים וקוד. Lunar Prospector GRS (B7); *PNAS* (doi:10.1073/pnas.2515408123); Li; Tian et al. (2026), *EPSL* (doi:10.1016/j.epsl.2026.119980). et al. (2026).

פתוח. לאן הלכו האדים: אל החלל דרך הפתח, התעבו מחדש בשוליים (שם היחס רק חוזר לרמת הרמות), או שניהם? כמה אבד: אובדן קטן (אחוזים ספורים) על פני שטח עצום, או אובדן גדול? יחס נמוך אינו כמות שאבדה, משום שגם ערבוב משפיע עליו. יש לצטט את המקור בעברית על ההתייבשות החריגה. מבחן ערבוב מול אידוי: מודל משותף של FeO, Th, K, והמינרלוגיה, שבדוק אם נשאר חוסר באשלגן התואם את האיזוטופים.

B12 מעטפת ענייה בחמצן

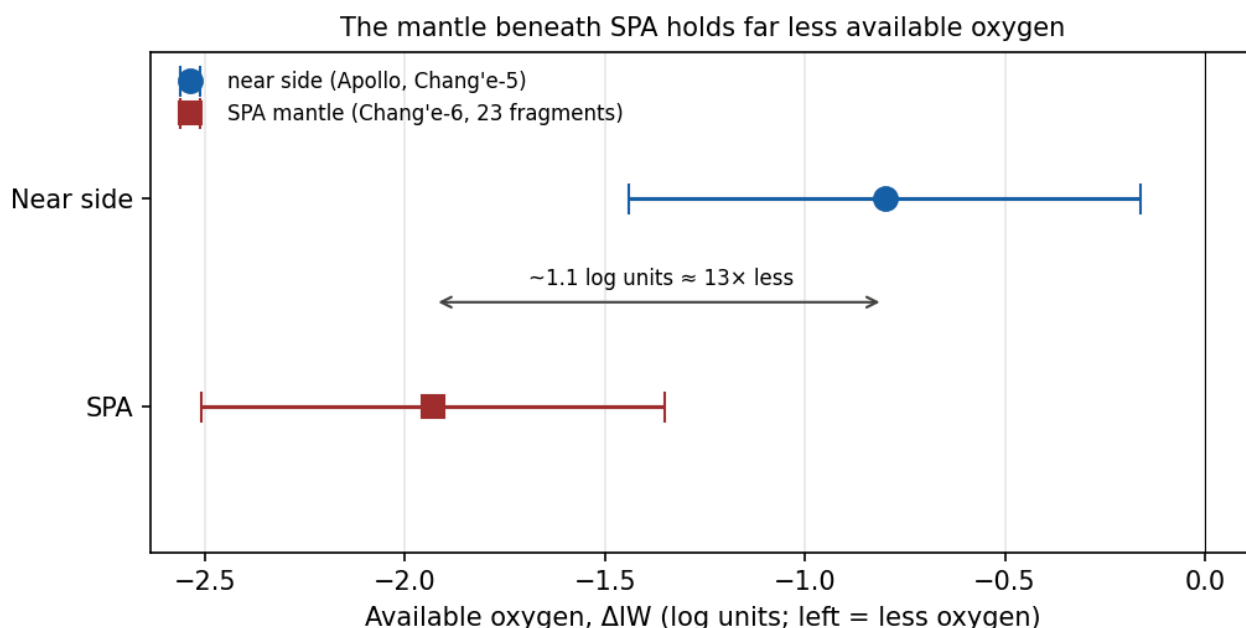
בקצרה. מקור המעטפת של בזלות Chang'e-6 מחזיק פי 13 בערך פחות חמצן זמין מן המעטפת שמתחת לצד הקרוב. במודל: חום ממושך, שחרור גזים ואידוי סילקו את החומרים נושאי החמצן, והברזל מכדור הארץ, שהגיע אל בסיס SPA, קשר את מה שנשאר והתרכז שם כשהחומרים האחרים עזבו. עם ההתקררות המצב ננעל.

B11 הראה שהחום גירש את היסודות הנדיפים. סעיף זה מראה עקבה שנייה של אותו חום, ואת העקבה הכימית הראשונה של הברזל של B10: המעטפת שמתחת ל-SPA איבדה חלק גדול מן החמצן הזמין שלה.

מה פירוש "מחוזר". בחומר חם, הברזל יכול להיות מוחזק בשתי צורות: כמתכת, או בצירוף עם חמצן כתחמוצת ברזל. איזו צורה גוברת תלוי בכמות החמצן החופשי להגיב — הפוגסיות שלו, ולמעשה הלחץ הכימי של החמצן. חומר עם הרבה חמצן חופשי נקרא מחומצן; חומר עם מעט נקרא מחוזר. גאוכימאים מודדים זאת מול ייחוס קבוע, קו ברזל-ווסטיט (IW): רמת החמצן שבה ברזל מתכתי ותחמוצת ברזל (ווסטיט, FeO) יכולים בדיוק להתקיים זה לצד זה. $IW\Delta$ הוא המרחק מן הקו הזה ביחידות לוגריתמיות, כך שכל יחידה היא גורם של עשרה. ערך שלילי פירושו פחות חמצן מן הקו: תנאים שבהם ברזל מתכתי יציב ואינו מחליד.

STEP 1 האנומליה

Zhang et al. (2025a) הפעילו שתי שיטות בלתי תלויות (ונדיום בספינל, אירופיום בפירוקסן) על 23 שברי בזלת מ-Chang'e-6. שתי השיטות נשענות על יסודות שמשנים את מטענם החשמלי לפי החמצן הזמין — ונדיום ואירופיום לובשים צורה שונה בהתכה מחוזרת מאשר בהתכה מחומצנת — והגבישים שגדלו בהתכה (ספינל ופירוקסן) מתעדים איזו צורה הייתה נוכחת. ההסכמה בין שתי שיטות בלתי תלויות הופכת את התוצאה למוצקה.



איור B12.1. חמצן זמין (ΔIW , יחידות לוגריתמיות; שמאלה — פחות חמצן) במעטפת שמתחת ל-SPA (Chang'e-6, 23 שברים) ומתחת לצד הקרוב (Apollo, Chang'e-5). ההבדל של כ-1.1 יחידות לוגריתמיות מתאים לחמצן זמין קטן פי 13 בערך מתחת ל-SPA.

על מה להסתכל: דגימות SPA יושבות משמאל לדגימות הצד הקרוב, בערך ביחידה לוגריתמית אחת. משום שהסולם לוגריתמי, הבדל של כ-1.1 יחידות הוא גורם של כ-13, לא גורם של 1.1.

היכן	ΔIW
מתחת ל-SPA (Chang'e-6)	-1.93 ± 0.58
מתחת לצד הקרוב (Apollo, Chang'e-5)	-0.80 ± 0.64

טבלה: החמצן הזמין במקור המעטפת (B12).

הצבע מסמן את הכיוון: כחול למעטפת המחוזרת יותר, אדום למחומצנת יותר. ההבדל בין שני הערכים המרכזיים, -1.93 לעומת -0.80 , הוא הגורם של כ-13 שבאיור.

מינוח. ΔIW מודד כמה חמצן זמין לתגובות כימיות בחומר — לא חמצן כגז. בירח הצעיר החמצן היה קשור בחומר. אתר הדגימה נמצא בתוך אזור הים, כ- 11.6° ממרכז הכיפה. הבזלות עצמן בנוות כ-2.8 מיליארד שנה ומתעדות את מצב מקור המעטפת שלהן: כשמעטפת נמסה, ההתכה נושאת את מצב החמצן של המקום שממנו באה, ולכן בזלת היא דגימה של מקור המעטפת שלה שנלקחה בזמן התפרצותה.

על אותו מקור מעטפת נמצא גם שהוא "יבש במיוחד" (He et al. 2025) ו"מדולדל במיוחד" (Zhou et al. 2025). (B13)

STEP 2 החידה

מדוע המעטפת שמתחת ל-SPA ענייה כל כך בחמצן בהשוואה לצד הקרוב?

STEP 3 מה המדע אומר

שני תהליכים אפשריים (Zhang et al. 2025a): (1) התגבשות אסימטרית של אוקיינוס המאגמה — יותר ברזל שקע אל הליבה מתחת לצד הקרוב, והמעטפת שם נעשתה מחומצנת; (2) שחרור של גופרית ופחמן חד-חמצני

בפגיעה שיצרה את SPA, שחזר את המעטפת שמתחתיה. המחברים כותבים שאימות אחד משני המנגנונים עדיין קשה.

STEP 4 היכן המדע נופל

מתיישב: יש שני מנגנונים אפשריים. אינו מכריע: המחברים עצמם אינם מבחינים ביניהם; שחרור בזמן פגיעה הוא אירוע קצר.

הכרעת המדע: מסביר בחלקו

שני מנגנונים יכולים ליצור מעטפת מחוזרת, אבל המחברים עדיין אינם יכולים להבחין ביניהם, ושחרור גזים בפגיעה הוא אירוע קצר.

STEP 5 מה המודל אומר

חום, שחרור גזים ואידוי — ובנוסף, ברזל. טמפרטורה ממושכת, שחרור גזים ואידוי דוחפים את החמצן לאזורים אחרים; החום מגרש את החמצן ושורף אותו. בניסוח מדויק: חום ממושך, שחרור גזים ואידוי סילקו את החומרים נושאי החמצן, והברזל קשר את מה שנשאר — שני המנגנונים מאותו מקור חום.

הברזל מכדור הארץ. חומר נושא ברזל מפנים כדור הארץ עלה אל הירח, וגם אל השכבות העמוקות שמתחת ל-SPA; לברזל הזה היו השפעות תרמודינמיות — ברזל מתכתי "סופג" חמצן. ברזל מתכתי וחמצן חופשי אינם נשארים נפרדים: הברזל מתרכב עם החמצן לתחמוצת ברזל, כמו כרית צמר פלדה שנשארה במים מחלידה ולוקחת חמצן מן המים שסביבה. אספקה גדולה של מתכת מורידה אפוא את החמצן של החומר שסביבה.

הוא לקח את החמצן במרכז, ונשאר שם. מתחת ל-SPA לא היה זרם עולה שיישא את הברזל מעלה ומטה; היו חימום וקירור. הברזל לקח את החמצן במקום שבו שכב, וכשהחום גירש את החומרים האחרים, הברזל שנותר התרכז, והחמצן קשור בו. זו המסה העמוקה של B10.

במרכז יש הכי מעט חמצן, וזה ננעל. חמצן שהגיע מאוחר יותר כבר לא נספג; החומר נשאר עני בחמצן בזמן שהתקרר. משהחומר מתקשה, מצב החמצן שלו קופא.

דרישה. מה שהגיע לבסיס של SPA נשא מתכת. באותו זמן לכדור הארץ לא הייתה ממש מעטפת ולא ממש ליבה: פנימו היה מעורב למדי, וחומר נושא ברזל עלה אל הירח וגם אל בסיס SPA (מאמר 3, C.10). הנימוק ישיר. אילו החומר שבא מכדור הארץ היה סיליקט מחומצן בלבד, הוא היה מביא איתו חמצן ומעלה את ה-IWΔ שמתחת ל-SPA מעל לזה של הצד הקרוב, לא מוריד אותו. מעטפת ענייה בחמצן פי 13 יכולה להיווצר רק מחומר שלוקח חמצן, וזו מתכת; החומר נושא הברזל שהגיע אל בסיס SPA סיפק אותה.

STEP 6 כיצד זה מתאים למודל

מה המודל אומר	מה נמצא
מעטפת ענייה בחמצן מתחת לאזור המחומם	$1.93 \text{ IW}\Delta$ – לעומת -0.80 בצד הקרוב ✓
הכי מעט חמצן במרכז אזור הים	אתר Chang'e-6 נמצא בתוך אזור הים — המעטפת הענייה ביותר בחמצן הידועה ✓
אותו מקור חום: גם אידוי	מעטפת יבשה במיוחד; אשלגן וברזל כבדים איזוטופית (B11) ✓
הברזל קשר את החמצן והתרכז במקומו	המסה העמוקה (B10) ✓

הטבלה קושרת את B12 לשכניו: שתי השורות הראשונות הן המדידה של הסעיף הזה עצמו, השלישית קושרת אותו לאידיוי של B11, והרביעית למסה העמוקה של B10. שלוש מדידות נפרדות — כבידה, איזוטופים וחמצן — נקראות כמעשה ידיו של מקור חום אחד ושל אספקה אחת של ברזל.

הכרעת המודל: מתאים

מקור חום ממושך אחד, שגירש את החמצן וסיפק ברזל לקשור את השאר, נותן את המעטפת הענייה ביותר בחמצן הידועה במרכז אזור הים, יחד עם המעטפת היבשה, האיזוטופים הכבדים והמסה העמוקה.

מה זה מראה. ניבוי: דגימות עתידיות מתוך SPA אבל מחוץ לאזור הים צריכות להראות יותר חמצן זמין מ-Chang'e-6; דגימות מתוך אזור הים צריכות להראות מעט כמו Chang'e-6 או פחות. הניבוי הזה נובע מן המבנה של המודל, מן המרכז החוצה: הברזל והחום רוכזו באזור הים, ולכן אובדן החמצן צריך להיות החזק ביותר שם. קשר ל-B16 (מגנטיות): גבישים זעירים של המטיט ומגהמיט — תוצרי חמצון שנוצרו באדים חולפים — נמצאו בדגימות Chang'e-6, והוצעו כנושאים של האנומליות המגנטיות בשולי SPA. במודל הם החמצן שנדחף לאזורים אחרים; הדבר נבחן ב-B16.

נתונים וקוד. Zhang et al. (2025a), *Nature Communications* 16 (doi:10.1038/s41467-025-62341-5); Zhou et al. (2025), *Nature* 643, 371–375 (doi:10.1038/s41586-025-09131-7; (מעטפת מדולדלת במיוחד); He et al. (2025), *Nature* (doi:10.1038/s41586-025-08870-x; (מעטפת יבשה).

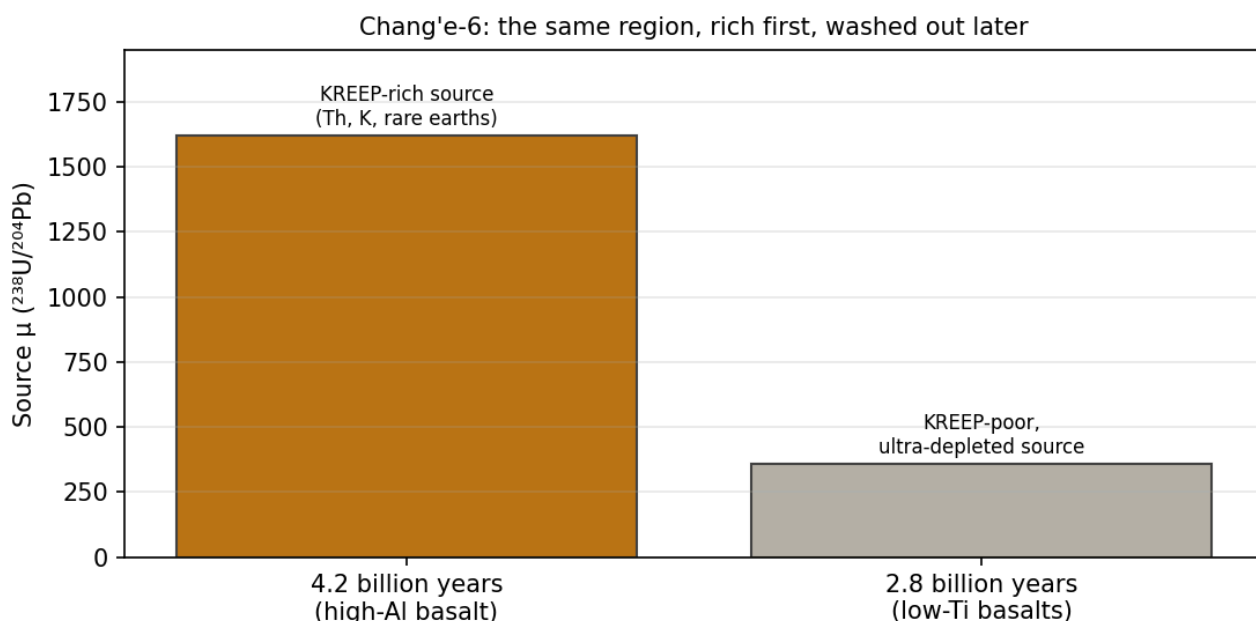
B13 מקור מדולדל

בקצרה. הבזלת העתיקה מ-SPA (4.2 מיליארד שנה) באה ממקור עשיר בתוריום, באשלגן וביסודות אדמה נדירה; הבזלות הצעירות (2.8 מיליארד שנה) מאותו אזור באו ממקור מדולדל במיוחד. במודל: החומר הגיע מכדור הארץ עשיר, וחום מלמטה דלדל אותו בזמן שהירח היה מחובר — התכה עזבה שוב ושוב ונשאה איתה את היסודות הבורחים.

B11 ו-B12 קראו את מה שהחום גירש כאדים. סעיף זה קורא את מה שהחום לקח בדרך אחרת: בהתכה. הוא משווה שתי בזלות מאותו מקום, שנוצרו בהפרש של 1.4 מיליארד שנה, ושואל מה השתנה במקור שלהן בין שתיהן.

STEP 1 האנומליה

מינוח. יסודות שאינם נכנסים לגבישים (תוריום, אשלגן, יסודות האדמה הנדירה) בורחים אל ההתכה בכל פעם שחומר נמס. מעטפת מדולדלת היא מעטפת שהתכה כבר עזבה אותה — שארית "שטופה". זה כמו שקית תה: הכוס הראשונה לוקחת את הטעם החזק, וכל כוס מאוחרת יותר מאותה שקית חלשה יותר, משום שמה שמתמוסס בקלות כבר הלך. על הירח היסודות הבורחים האלה מקובצים תחת שם אחד, *KREEP*: K לאשלגן, REE ליסודות האדמה הנדירה, P לזרחן. מקור עשיר ב-*KREEP* עדיין מחזיק אותם; מקור עני ב-*KREEP* איבד אותם.



איור B13.1. אותו אזור (Chang'e-6) בשני זמנים, כפי שמראה ה- μ של המקור ($^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$): מקור עשיר ב-KREEP לפני 4.2 מיליארד שנה (בזלת עתירת Al), ומקור עני ב-KREEP, מדולדל במיוחד (שטוף), לפני 2.8 מיליארד שנה (בזלות דלות Ti).

המדד שמשמש באיור, μ , הוא היחס בין אורניום-238 לעופרת-204 במקור. האורניום שייך ליסודות הבורחים ועוזב עם ההתכה; עופרת-204 אינה נוצרת מדעיכה ונשארת קבועה. μ גבוה מסמן מקור שעדיין מחזיק את יסודותיו הבורחים, ו- μ נמוך מקור שאיבד אותם. על מה להסתכל: אותו מקום נתן תחילה מקור בעל μ גבוה ומאוחר יותר מקור בעל μ נמוך.

מה	מה נמצא	מקור
הבזלות הצעירות (2.8 מיליארד שנה)	דלדול קיצוני: $\text{Sr}^{86}/\text{Sr}^{87}$ התחלתי -15.80 $\text{Nd}\epsilon$; 0.699329–0.699237 16.13	Zhou et al. 2025
אותן בזלות	מקור עני ב-KREEP, $\mu \approx 360$	Zhang et al. 2025b
הבזלת העתיקה (4,203±4 מיליון שנה)	מקור עשיר ב-KREEP, $\mu \approx 1620$	Zhang et al. 2025b
משמעות (מן הספרות)	המקור המדולדל והעמיד-חום מעכב התכה: מעט התפרצויות למרות הקרום הדק	צוות Xu (Cui et al. 2024)

טבלה: המקור העשיר והמקור השטוף באותו אזור (B13).

כתום מסמן את המקור העשיר, כחול את השטוף. ערכי הסטרונציום והניאודימיום בשורה הראשונה הם שני מדדים נוספים של אותו דלדול, הנקראים מדעיכה רדיואקטיבית. רובידיום, שעוזב עם ההתכה, דועך לאט לסטרונציום-87; מקור שאיבד את הרובידיום שלו מוקדם מייצר מעט סטרונציום-87, וה- $\text{Sr}^{86}/\text{Sr}^{87}$ שלו נשאר נמוך — כמו כאן. ניאודימיום עוזב עם ההתכה ביתר קלות מסמרים, הדועך לניאודימיום-143; מקור שאיבד ניאודימיום מוקדם נשאר עשיר יחסית בסמרים ומייצר ניאודימיום-143 נוסף. $\text{Nd}\epsilon$ מודד את התוספת הזאת בחלקים לעשרת אלפים מול ייחוס לא מדולדל, ולכן ערך חיובי גבוה, כאן כ-16, מסמן מקור שנשטף זמן רב לפני שהבזלות שלו התפרצו. שני ערכי μ , כ-1,620 וכ-360, מראים את הירידה במספר אחד: המקור המאוחר מחזיק בין רבע לחמישית מן האורניום הבורח של המקור המוקדם.

מדוע המעטפת שמתחת ל-SPA שטופה כל כך — ומדוע אותו אזור התפרץ תחילה בבזלת עשירה ורק מאוחר יותר בבזלת שטופה?

STEP 3 מה המדע אומר

שני הסברים (Zhou et al. 2025): (1) המעטפת הייתה מדולדלת מלכתחילה, בהתגבשות אוקיינוס המאגמה; (2) הפגיעה שיצרה את SPA המיסה נפח גדול של מעטפת, וההתכה עזבה והשאירה שארית מדולדלת.

STEP 4 היכן המדע נופל

מתיישב: שני ההסברים נותנים מקור מדולדל. אינו מכריע: המחברים אינם מבחינים ביניהם; פגיעה היא אירוע יחיד ורגעי.

הכרעת המדע: מסביר

שני ההסברים המוצעים נותנים את המקור המדולדל שנצפה, אף שהמחברים אינם בוחרים ביניהם.

STEP 5 מה המודל אומר

עשיר מכדור הארץ, נשטף בחום. הבזלת העתיקה באה מכדור הארץ עשירה, אבל עם הזמן דולדלה בחום. החומר שהגיע בזרם לאורך האגס היה עשיר ביסודות הבורחים — זו הבזלת בת 4.2 מיליארד השנים, מתקופת הברנר.

המעטפת מדולדלת משום שהיה חום בבסיסה. חום מלמטה המיס את המעטפת שוב ושוב בזמן שהירח היה מחובר; בכל פעם ההתכה עזבה — מעלה והחוצה — ונשארה איתה את היסודות הבורחים, והשאירה שארית שטופה. זו שקית התה שמשמשת שוב ושוב: התכה אחת הייתה משאירה שארית מדולדלת בחלקה; התכה חוזרת משאירה את הדלדול הקיצוני. המקור כבר היה שטוף בזמן השחרור, והבזלות בנות 2.8 מיליארד השנים מתעדות את השארית השטופה הזאת כשקפאה לבסוף.

התוריום עזב עם ההתכה (B7, B9, B11). ההתכה נושאת התוריום זרמה מן המרכז והוסטה לעבר הסהר. היסודות החסרים במקור שבמרכז אינם אבודים אפוא; הם נמצאים בסהר.

STEP 6 כיצד זה מתאים למודל

מה המודל אומר	מה נמצא
תחילה, חומר עשיר מכדור הארץ	הבזלת בת 4.2 מיליארד השנים: מקור עשיר ב-KREEP) $\mu \approx 1620$ ✓
מאוחר יותר, שארית שנשטפה בחום	הבזלות בנות 2.8 מיליארד השנים: מקור מדולדל במיוחד) $\mu \approx 360$; $Nd\epsilon$ כ-16 ✓
הסדר: עשיר ← שטוף	אותו אזור, בהפרש של 1.4 מיליארד שנה ✓
היסודות הבורחים עזבו עם ההתכה	סהר התוריום (B7, B9) ✓

טבלה: דרישות המודל מול הממצאים (B13).

הצבעים חוזרים על אלה של הטבלה הקודמת, עשיר (כתום) ואחריו שטוף (כחול). העיקר בשורה השלישית הוא הסדר: במקום אחד, המקור העשיר בא ראשון והשטוף מאוחר יותר, וזה הסדר שחימום מלמטה, בזמן שהירח היה מחובר, יוצר. מעטפת שהייתה מדולדלת מלכתחילה לא הייתה נותנת קודם בזלת עשירה.

חומר עשיר שסופק מכדור הארץ ואחר כך הותך שוב ושוב מלמטה נותן את הרצף שנצפה באזור אחד: מקור עשיר ב-KREEP תחילה, שארית מדולדלת במיוחד מאוחר יותר, והיסודות הבורחים שנאספו בסהר התורים.

מה זה מראה. קשר ל-B8: שארית שטופה ועמידת-חום קשה להתכה, ולכן לבה מאוחרת ב-SPA נדירה (כפי שמסיק גם צוות Xu). היסודות שגורמים למעטפת להימס בקלות הם בדיוק אלה שעזבו; מה שנשאר זקוק ליותר חום כדי להימס, ולכן האגן, למרות הקרום הדק שלו, מראה מעט לבה מאוחרת.

נתונים וקוד. Zhang et al.; Zhou et al. (2025), *Nature* 643, 371–375 (doi:10.1038/s41586-025-09131-7). Cui et al. (2024), *Science*; al. (2025b), *Nature* (doi:10.1038/s41586-024-08382-0).

B14 מתכת בנוריתים העתיקים

בקצרה. שני נוריתים בני 4.25 מיליארד שנה מכילים מתכת ברזל-ניקל ביחס ניקל/קובלט של 8.5–11. המדע קורא זאת כחומר של הגוף הפוגע; אבל ברזל מכדור הארץ, שהותך מחדש בסביבה ענייה בחמצן ועורבב עם המתכת שכבר בירח, נותן גם הוא יחס כזה. מה שיכריע הוא ההרכב האיזוטופי של המתכת.

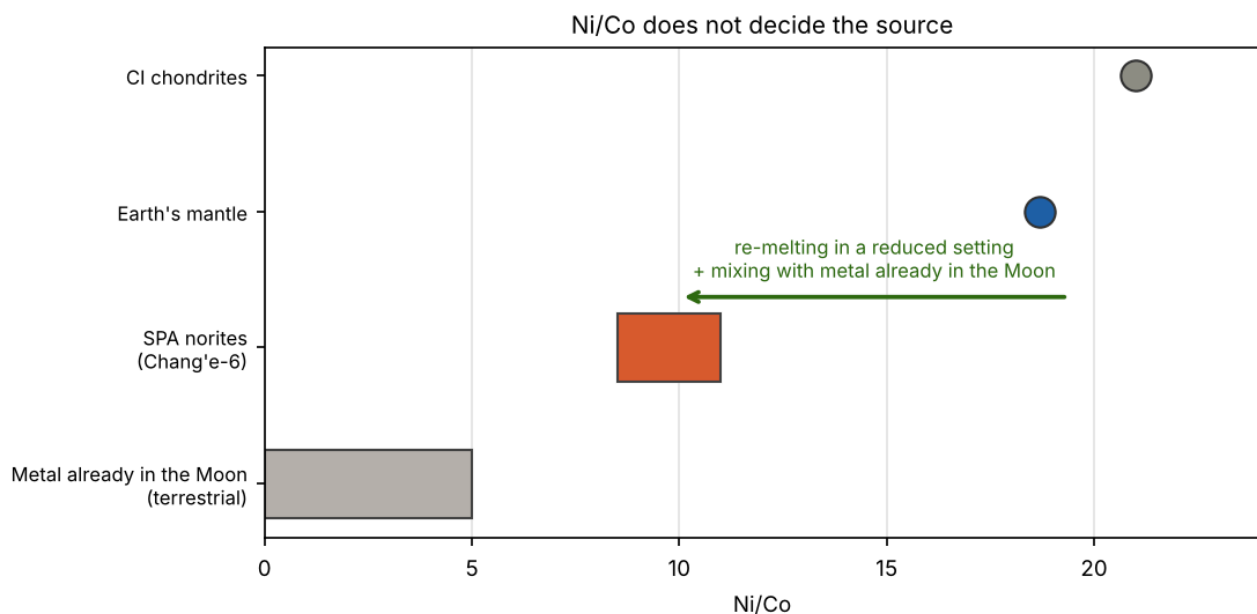
B10 ו-B12 עקבו אחר הברזל מכדור הארץ בכבידה ובחמצן של המעטפת. סעיף זה מגיע אל הברזל עצמו: גרגירי מתכת שאפשר להחזיק ביד. זה גם המקום שבו המודל נותן את הניבוי החד ביותר שלו.

מהו נורית. נורית הוא התכה שהתגבשה, העשויה בעיקר מפלגיוקלז (המינרל הבהיר של רמות הירח) ומפירוקסן דל סידן. הנוריתים של Chang'e-6 הם שברים (clasts), קטעים ממנו שנאספו בקרקע שהוחזרה. הם התגבשו לפני $4,247 \pm 5$ מיליון שנה (Su et al. 2025; B7) — 4.25 מיליארד השנים של סעיף זה — כשברירת ההתכה שמעל הברנר התמצקה. אירוע מאוחר יותר איפס את גיליהם ב- 3.873 ± 0.008 Ga (Su et al. 2025): אירוע שהפעיל מחדש את השעונים הרדיואקטיביים שלפיהם נקרא גילם. במודל האירוע הזה הוא הניתוק עצמו, סוף השלב המחובר (B15). גרגירי המתכת היו בתוך הנוריתים כשנוצרו. הם חלק מן הדגימה מלידתה, ולא אבק שנפל על פני השטח מאוחר יותר, וזה מה שהופך אותם למכריעים (E.7).

מדוע ניקל וקובלט. גם ניקל וגם קובלט מעדיפים מתכת על פני סיליקט — הם *סידרופיליים* (אוהבי-ברזל) — ולכן הם הולכים אחרי הברזל לכל מקום שאליו הוא הולך. היחס ביניהם, Ni/Co, שונה בין מאגרים ומשמש טביעת אצבע ראשונה למקום שממנו באה מתכת.

STEP 1 האנומליה

Su et al. (2025, *National Science Review* 12, nwaf103; doi:10.1093/nsr/nwaf103) מדווחים על גרגירי מתכת ברזל-ניקל בשני שברי נורית (CE6C0100YJFM002-158 ו-CE6C0200YJFM001EGP07-16) עם Ni/Co של 8.5–11, מעל הערכים שנמדדו למתכת שכבר בירח (מתחת ל-5).



איור 14.1. יחס Ni/Co של המתכת שכבר בירח (שבעצמה ארצית, ושהגיעה מזמן לשיווי משקל בירח), של נוריטי SPA (Chang'e-6), של מעטפת כדור הארץ ושל מטאוריטים פרימיטיביים (CI). החץ מסמן את הורדת היחס בהתכה מחדש בסביבה מחוזרת ובערבוב עם המתכת שכבר בירח.

על מה להסתכל: נוריטי SPA נמצאים בין המתכת שכבר בירח בצד הנמוך לבין כדור הארץ והמטאוריטים בצד הגבוה. החץ מראה את קריאת המודל: מתכת שהתחילה גבוה, קרוב לערך של כדור הארץ, והורדה אל הטווח הנמדד.

Ni/Co	חומר
מתחת ל-5	המתכת שכבר בירח
8.5–11	נוריטי SPA
18.7 (McDonough & Sun 1995)	מעטפת כדור הארץ
21.0 (McDonough & Sun 1995)	מטאוריטים פרימיטיביים (CI)
כ-20, מסדר גודל מטאוריטי	ליבת כדור הארץ

טבלה: יחס Ni/Co במאגרים השונים (B14).

הצבע מעמיק ככל שהיחס עולה. הנקודה העיקרית של הטבלה היא שלוש השורות התחתונות: מעטפת כדור הארץ (18.7), ליבת כדור הארץ (כ-20) והמטאוריטים הפרימיטיביים (21.0) קרובים זה לזה. יחס מעל זה של המתכת שכבר בירח מסמן אפוא מתכת שעוד לא הגיעה לשיווי משקל בירח, אבל אינו מבחין בין כדור הארץ למטאוריט.

STEP 2 החידה

מאין באה מתכת שיחס ה-Ni/Co שלה גבוה מזה של המתכת שכבר בירח?

STEP 3 מה המדע אומר

יחס כזה הוא מטאוריטי: חומר של הגוף הפוגע, שנלכד בבריכת ההתכה (Su et al. 2025). זו נקודת עימות ותיקה עם המודל.

STEP 4 היכן המדע נופל

הקריאה מחזיקה מבחינה זו שהיחס גבוה מזה של המתכת שכבר בירח. היא אינה מכריעה: גם ברזל מכדור הארץ נותן יחס גבוה, והיחס משתנה כשהמתכת מתחלקת בין מתכת, סיליקט וסולפיד. גרגיר מתכת אינו דגימה אטומה של מקורו; בכל פעם שהוא נמס הוא מחליף ניקל וקובלט עם הסיליקט והסולפיד שסביבו, והיחס שלו זז.

הכרעת המדע: מסביר

מקור מטאוריטי מסביר יחס Ni/Co מעל זה של המתכת שכבר בירח.

STEP 5 מה המודל אומר

המתכת היא ברזל מכדור הארץ, שהביאה הזרימה לאורך האגס, ושנלכד בנוריטים כשברירת ההתכה שמעל הברנר התמצקה (B7).

אם החומר ארצי והיחס בליבת כדור הארץ הוא כ-20, האם היחס יכול היה לרדת בתנאים השונים של אותו זמן, בדרך מכדור הארץ אל SPA? הוא יכול היה, בשתי דרכים:

- 1. שיווי משקל מחודש בסביבה ענייה בחמצן. גם ניקל וגם קובלט מתחלקים אל המתכת, אבל בסביבה ענייה בחמצן יותר ברזל וקובלט נכנסים למתכת, והיחס יורד. המעטפת שמתחת ל-SPA מחוזרת מאוד (B12), והמתכת הותכה מחדש בברירת ההתכה, בלחץ נמוך. ניקל נכנס למתכת כמעט בכל תנאי; קובלט להוט פחות ומצטרף למתכת בכמויות גדולות יותר רק כשהחמצן מועט. לכן ככל שהסביבה מחוזרת יותר, המתכת לוקחת יותר קובלט, וה-Ni/Co שלה נמוך יותר.
- 2. ערבוב עם המתכת שכבר בירח. מתכת מן הברזל העמוק של כדור הארץ (כ-20) המעורבת בערך חצי-חצי עם המתכת שכבר בירח — שבעצמה ארצית, אבל הגיעה מזמן לשיווי משקל בירח (מתחת ל-5) — נותנת כ-10–12, הטווח הנמדד.

עידון: במודל הברזל בא מן הברזל העמוק של כדור הארץ בזמן שהליבה שלו עדיין התארגנה — חומר הטרם-ליבה שנכנס לאגס — ולכן היחס שלו אינו חייב להיות ערך הליבה של היום, 20.

יחס ה-Ni/Co ניתן אפוא להשגה מכדור הארץ באותה מידה כמו ממטאוריט, ולכן אינו יכול להכריע ביניהם. מה שיכול להכריע הוא תכונה שהתכה מחדש וערבוב אינם נוגעים בה: האיזוטופים.

מדוע האיזוטופים מכריעים. גופי מערכת השמש נוצרו באזורים שונים של הדסקה הקדומה של גז ואבק, וכל אזור קיבל תערובת מעט שונה של איזוטופים של יסודות כמו כרום, טיטניום, מוליבדן, רותניום ואוסמיום. כל גוף נושא אפוא חתימה איזוטופית של מקום הולדתו, כמו שיון נושא את טעם האדמה שלו. כדור הארץ והירח חולקים חתימה אחת; רוב המטאוריטים נושאים חתימות שונות באופן מדיד. התכה, התקררות, שיווי משקל מחודש וערבוב עם המתכת שכבר בירח — שבעצמה נושאת את החתימה המשותפת של כדור הארץ והירח — יכולים להזיז את יחס ה-Ni/Co, אבל אינם משנים את החתימה האיזוטופית של המתכת. אם המתכת בנוריטים באה מכדור הארץ, האיזוטופים שלה יתאימו לכדור הארץ; אם באה מגוף זר, החתימה הזרה תיראה.

STEP 6 כיצד זה מתאים למודל

מה המודל אומר	מה נמצא
מתכת מכדור הארץ בברירת ההתכה	מתכת ברזל-ניקל בנוריטים בני Ga 4.25 ✓
היחס ירד בדרך מכ-20	11–8.5, בין המתכת שכבר בירח לערכי כדור הארץ ✓

טבלה: דרישות המודל מול הממצאים (B14).

שתי השורות הראשונות מתקיימות; השלישית, המוצללת, היא הפתוחה, והיא זו שמכריעה.

הכרעת המודל: מתאים בחלקו

היחס מתאים; ההכרעה נתונה בידי האיזוטופים.

פתוח. ניבוי ומבחן: האיזוטופים של כרום, טיטניום, מוליבדן, רותניום ואוסמיום של המתכת בשני השברים צריכים לשאת חתימה ארצית, בלי סטייה מטאוריטית; שיווי משקל מחודש וערבוב משנים את יחס ה-Ni/Co אבל לא את החתימה האיזוטופית, ולכן האיזוטופים קוראים ישירות את מקור המתכת. זה הניבוי החד ביותר של המאמר: המודל גורס שהירח אינו מכיל חומר מחוץ למערכת כדור הארץ-ירח מעבר לכמויות זעירות — אבק חלל דק שנמשך מאוחר יותר אל שכבת פני השטח שלו, ואולי מטאוריט אחד או שניים בארבעה מיליארד שנה — והגרגירים האלה, המתוארכים והאטומים בתוך הנוריטים שלהם מזה 4.25 מיליארד שנה, הם המקום שבו אפשר לבדוק את הטענה הזאת ישירות (חלק F). אם זה אותו ברזל כמו במסה העמוקה (B10) ובמעטפת המחוזרת (B12) נשאר פתוח; הנתונים חסרים.

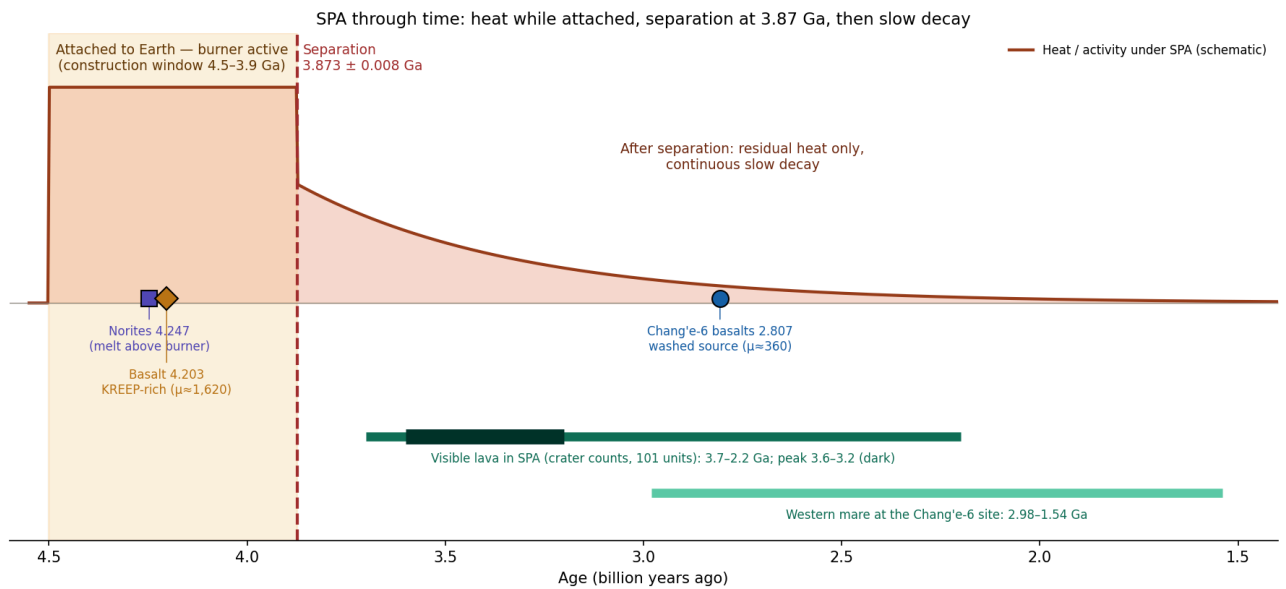
B15 געשיות ממושכת

בקצרה. ב-SPA עלה חומר מותך במשך 2 מיליארד שנים לפחות, מ-4.25 ועד 2.2 מיליארד שנים (Ga). במודל, הברנר פעל כל עוד הירח היה מחובר, ונרגע עם הרפיית הפחיסות, לפני השחרור; הניתוק, לפני 3.87 מיליארד שנים, סגר את שלב החיבור; מכאן ואילך פעל רק חום שיורי, ברציפות ובדעיכה איטית, דרך הנקודה האסטרטגית, והנפחים קטנו.

השאלה שסעיף זה עונה עליה היא כמה זמן נשאר SPA חם, ומה שמר על חומו. הגילים נתונים במיליארדי שנים (Ga) לפני היום: 4.25 מיליארד שנים פירושו לפני 4.25 מיליארד שנה, קרוב להולדת הירח, ו-2.2 מיליארד שנים הוא יותר משני מיליארד שנה מאוחר יותר. "ממושכת" פירושו שההתכות המתוארכות של SPA אינן מתקבצות סביב רגע אחד, כפי שהיו מתקבצים תוצריה של מכה יחידה; הן פרושות מ-4.25 עד 2.2 מיליארד שנים, טווח של 2 מיליארד שנים לפחות, שבו חומר מותך הוסיף להגיע אל פני השטח או לקפוא ממש מתחתם. הטווח הזה מונה את כל ההתכה שתוארכה ב-SPA, מן הנוריטים העמוקים ועד הלבה הנראית הצעירה ביותר; הנתון של כ-1.5 מיליארד שנים ב-B9 מתייחס לחלק אחד ממנו, הלבה של הים המרכזי.

STEP 1 האנומליה

הגילים באים משני סוגי מדידה, והטבלה שלהלן מערבת אותם במכוון. גיל מעבדה נקרא מדעיכת יסודות רדיואקטיביים בתוך הגבישים של דגימה שהובאה לכדור הארץ; הוא מדויק עד כמה מיליוני שנים (ה- $\pm$ שבטבלה), אבל שייך לשבר יחיד. גיל מספירת מכתשים נקרא ממסלול: ככל שמשטח לבה חשוף זמן רב יותר, כך הוא אוסף יותר מכתשים, ולכן ספירת המכתשים על מרבד לבה נותנת את גילו; הוא פחות מדויק, אבל מכסה מרבדים שלמים ברחבי האגן. שני מונחים חוזרים. *נוריטים* הם חומר גס-גרגר של פלגיוקלז ופירוקסן דל-סידן, המתגבש לאט מגוף גדול של התכה מתחת לפני השטח. *KREEP* הוא הקיצור הירחי לחומר עשיר באשלגן (K), ביסודות אדמה נדירים (REE) ובזרחן (P), יחד עם תוריום ואורניום. הערך μ הוא היחס בין אורניום לעופרת (²³⁸U/²⁰⁴Pb) במקור שממנו הותך בזלת; μ גבוה מסמן מקור עשיר ב-KREEP, ו- μ נמוך מקור מדולדל.



איור B15.1. ציר הזמן של SPA: גילים שנמדדו (נקודות), טווחי הלבנה הנראית (פסים), והחום מתחת ל-SPA (עקומה סכמטית); גובהה וקצבה אינם מחושבים). הרצועה המוצללת היא תקופת החיבור, כשהברנר פעיל (חלון הבנייה 3.9–4.5 מיליארד שנים); הקו המקווקו הוא הניתוק, ב- 3.873 ± 0.008 מיליארד שנים.

האיור נקרא משמאל (ישן) לימין (צעיר). הנקודות שמשמאל נמצאות בתוך הרצועה המוצללת, תקופת החיבור; הקו המקווקו מסמן את הניתוק; הפסים מימינו הם הלבנה הנראית, הנמשכת זמן רב אחרי הניתוק, אבל במרבדים קטנים יותר. העקומה היא רק שרטוט של סדר האירועים — חום גבוה בזמן החיבור, ואחריו ירידה איטית — וגובהה ושיפועה אינם מחושבים.

גיל (מיליארד שנים)	מה	מקור
4.247 ± 0.005	נוריתים: התכה שהתמצקה לאט	Su et al. 2025, NSR (doi: 10.1093/nsr/nwaf103)
4.203 ± 0.004	שבר בזלת עשיר באלומיניום, ממקור עשיר ב-KREEP ($\mu \approx 1\,620$)	Zhang et al. 2025b, <i>Nature</i> (doi: 10.1038/s41586-024-08382-0)
3.873 ± 0.008	אירוע שאיפס את גילי הנוריתים	Su et al. 2025
3.7–2.2 (שיא 3.2–3.6)	לבה נראית בתוך SPA ובסביבתו: ספירות מכתשים על 101 מתוך 129 מרבדים; עובי 31–273 מ', נפח $1-2,630$ קמ"ק	Pasckert et al. 2018, <i>Icarus</i> (doi: 10.1016/j.icarus.2017.07.023)
2.98–1.54	הים המערבי באתר Chang'e-6 (ספירות מכתשים)	הספרות על Chang'e-6
2.807 ± 0.003	כ-99% משברי הבזלת של Chang'e-6, ממקור מדולדל ($\mu \approx 360$)	Zhang et al. 2025b; Cui et al. 2024, <i>Science</i> (doi: 10.1126/science.adt1093)

טבלה: הגילים שנמדדו ב-SPA, מן הישן לצעיר (B15).

הטבלה עוברת מן הגיל הישן ביותר בראשה אל הצעיר ביותר בתחתיתה. שלושה דברים בה נושאים את הטיעון. ראשית, שני הגילים הישנים ביותר, 4.247 ו-4.203 מיליארד שנים, הם התכות שנוצרו בהפרש של כ-45 מיליון שנה זו מזו, מוקדם בתולדות הירח. שנית, הנוריתים נושאים תאריך שני, 3.873 ± 0.008 מיליארד שנים: אירוע

חימום חזק דיו כדי להפעיל מחדש את השעונים הרדיואקטיביים שלהם, אבל לא כדי ליצור אותם מחדש. שלישית, הלבה הנראית מאוחרת בהרבה, קטנה ודקה: מרבדים בעובי 31–273 מ' ובנפח של 1 עד 2,630 קמ"ק כל אחד, כמות צנועה לאגן שקוטרו 2,400 ק"מ. בין ראש הטבלה לתחתיתה יורד μ של המקור מכ-1,620 לכ-360: אותו אזור נתן התכה עשירה מוקדם והתכה מדולדלת מאוחר.

STEP 2 החידה

מדוע עלה חומר מותר באותו אזור במשך 2 מיליארד שנים לפחות, ומדוע הנפחים הלכו וקטנו?

STEP 3 מה אומר המדע

חום פנימי: חום מיסודות רדיואקטיביים בתוך הירח, הדועך עם הזמן; בצד הרחוק יש ממנו פחות. **קרום דק:** ב-SPA הקרום הדק ביותר והאגן העמוק ביותר, ולכן המאגמה מגיעה אל פני השטח בקלות יחסית, והפעילות חוזרת לאותו אזור. **מקור מדולדל:** המעטפת שם מדולדלת ועמידה להתכה, ולכן יצאו רק נפחים קטנים. **מקורות שונים:** הבזלת העשירה (4.20 מיליארד שנים) והבזלת המדולדלת (2.81 מיליארד שנים) באו ממקורות נפרדים במעטפת (Zhang et al. 2025b). 3.87 מיליארד שנים: פגיעה מאוחרת יותר, נפרדת מזו שיצרה את SPA, חיממה מחדש את הנוריתים ואיפסה את גילם (Su et al. 2025).

STEP 4 היכן המדע נופל

שני אירועים באותו מקום. כדי להסביר את 4.25 ו-3.87 מיליארד שנים, המדע זקוק לשתי פגיעות נפרדות באותה נקודה; הפגיעה השנייה אינה מזוהה עם מכתש או אגן מסוים. **מעט חום בצד הרחוק, ופעילות לאורך 2 מיליארד שנים.** מקורות החום הרדיואקטיביים מרוכזים בצד הקרוב, ובכל זאת ב-SPA עלה חומר מותר מ-4.25 עד 2.2 מיליארד שנים. ההסבר נשען על הקרום הדק, על הקלות שבהגיעה אל פני השטח, ולא על מקור החום. **מקור עשיר ואחריו מדולדל.** ההסבר דורש שני מקורות נפרדים במעטפת מתחת לאותו אתר, אחד עשיר ב-KREEP אחד מדולדל מאוד. **גבול הנתונים:** ארבעה גילי מעבדה אינם מבחינים בין פעילות רציפה לבין אירועים נפרדים. **קרום דק הוא דרך, לא מקור חום:** הוא מאפשר להתכה לצאת ביתר קלות, אבל משהו עדיין צריך לייצר את ההתכה, ובצד הרחוק האספקה הרדיואקטיבית קטנה. זו הסיבה שתשובת "הקרום הדק" משאירה את משך הפעילות בלי הסבר.

הכרעת המדע: מסביר בקושי

כל ממצא מקבל הסבר, אבל דרך אירועים ומקורות נפרדים: שתי פגיעות באותה נקודה, ושני מקורות במעטפת.

STEP 5 מה אומר המודל

המודל קורא את הטבלה כולה כרצף אחד בשלושה שלבים: שלב חם בזמן שהירח היה מחובר, הניתוק שסיים אותו, וזנב התקררות ארוך.

בזמן החיבור: הברנר (3.87–4.5 מיליארד שנים). הנוריתים (4.25 מיליארד שנים) הם ההתכה שמעל הברנר (B7); הבזלת העשירה (4.20 מיליארד שנים) היא לבה של הים המרכזי, מחומר שהגיע מכדור הארץ במצב עשיר (B9, B13). שלב החיבור ארוך: הרפיית האזור חייבת להתרחש בתוכו — לפחות כ- 10^7 שנים, החסם שבו נעשה שימוש באומדן הצמיגות, ובמודל כ-600 מיליון שנה בסך הכול, מתחילת הבליטה ועד השחרור ב-3.873 מיליארד שנים. הברנר פעל בתוך השלב הזה ונרגע לפני סופו.

3.873 מיליארד שנים: הניתוק עצמו. הברנר נרגע עם הרפיית הפחיסות; הניתוק סגר את שלב החיבור, והאזור התקרר והתכווץ (B2, B3). איפוס השעונים של הנוריסים הוא סימנו של אירוע זה בדגימות, והוא נופל בסוף חלון הבנייה (כ-3.9 מיליארד שנים), כפי שהמודל דורש.

אחרי הניתוק: חום שיורי בלבד. החום שנאגר מתחת ל-SPA, ולא ברנר שני (B9): ברנר מכדור הארץ, ואחריו הנקודה האסטרטגית — קרום דק, פתחים קיימים, חום שיורי). גוף חם גדול מתקרר מבחוץ פנימה, ופנימו שומר על חומו זמן רב, כפי שקיר אבן עבה שומר את חום האש זמן רב אחרי שהאש כבתה. SPA חומם מלמטה לאורך כל שלב החיבור, ולכן החזיק מאגר חום גדול.

רציף, בדעיכה איטית. המקור התדלדל עם הזמן (B13), ולכן הנפחים קטנו. כל התכה הוציאה מן המקור את היסודות הנמסים ראשונים, כך שההתכה הבאה באה ממקור עני יותר ובנפח קטן יותר: זו הירידה של μ מכ-1,620 לכ-360.

מדוע השיא הנראה הוא ב-3.6–3.2 מיליארד שנים ולא מיד אחרי 3.87. שום לבה לא זרמה על פני השטח של SPA בפרק הזמן הזה. ה"לבה" הקבורה של B9 היא החומר שבין הברנר לבין החלק החיצוני של SPA, שהחום התיך במקומו, ובתוכו הים המרכזי, שחומם עם האזור ונמחק; היא שוכנת מתחת לפני השטח ומעולם לא הייתה שפיכה. אחרי הניתוק היא קפאה לאט, מבחוץ פנימה, ואת פרק הזמן 3.6–3.87 מיליארד שנים קוראים כקפיאה האיטית הזאת. גיל מספירת מכתשים אפשר לקרוא רק על משטח שעדיין חשוף; לחומר שקפא מתחת לפני השטח אין מכתשים משלו, והוא נושר מן הספירה.

רצף אחד ומקור אחד. 4.25 ו-3.87 מיליארד שנים הם שני שלבים של אותו תהליך, ברנר ואחריו ניתוק, ולא שתי פגיעות; והמקור העשיר והמדולדל הם אותו מקור, שהתחיל עשיר (חומר מכדור הארץ) והתדלדל בחום (B13).

STEP 6 כיצד זה מתאים למודל

כל שורה בטבלה מציינת ציפייה אחת של המודל מימין, ואת המדידה שעונה עליה משמאל.

מה המודל אומר	מה נמצא
התכה ולבה בזמן הברנר	4.25 מיליארד שנים (נוריסים), 4.20 מיליארד שנים (בזלת עשירה) ✓
אירוע בסוף חלון הבנייה (כ-3.9 מיליארד שנים): הניתוק, לא פגיעה שנייה	3.873 ± 0.008 מיליארד שנים ✓
פעילות מאוחרת באותה נקודה, בנפחים הולכים וקטנים	2.2–3.7 מיליארד שנים, מרבדים דקים וקטנים; 2.8 מיליארד שנים באתר בתוך אזור הים ✓
המקור התדלדל	$\mu \approx 1620$ ב-4.20 מיליארד שנים $\rightarrow \mu \approx 360$ ב-2.8 מיליארד שנים ✓
החומר הקבור הותך במקומו וקפא לאט; דבר לא זרם על פני השטח	לבה קבורה במרכז (13.6%–24.1% מן המעגל של 15°, B9) ✓

טבלה: ציפיות המודל מול הגילים והמרבדים שנמדדו (B15).

הכרעת המודל: מתאים

כל אחת מחמש הציפיות של המודל נענית בגילים ובמרבדים שנמדדו.

מה שיש בידינו עכשיו: הגילים של SPA יוצרים רצף אחד — חימום בזמן החיבור, הניתוק ב-3.873 מיליארד שנים, וזנב התקררות של נפחים הולכים וקטנים — ולא שתי מכות ושני מקורות שאינם קשורים זה לזה.

פתוח. ניבוי: החומר הקבור במעגל המרכזי קפא לאט אחרי הניתוק, והגילים שלו, 3.87 עד 3.6 מיליארד שנים, רושמים את הקפיאה הזאת; החלק ששייך לים המרכזי ישן יותר, מתקופת הברנר. ובאופן כללי יותר, ב-SPA אין לבה צעירה מזנב הרשומה, מתחת לכ-1.5 מיליארד שנים.

B16 המגנטיות של SPA

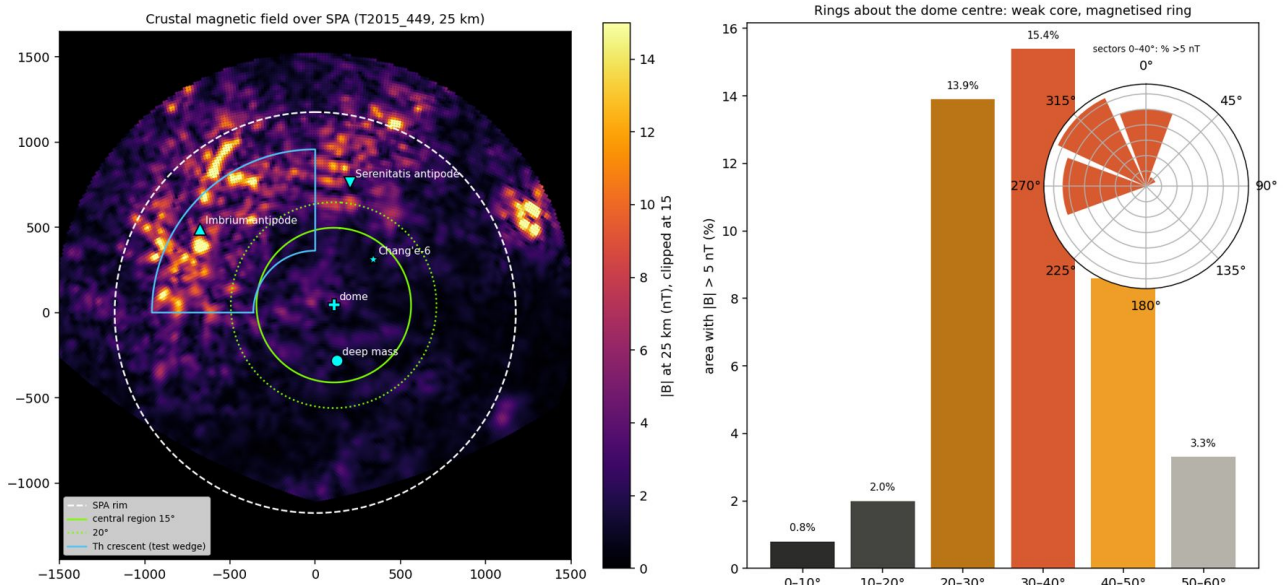
בקצרה. מרכז SPA כמעט נטול מגנטיות; טבעת ממוגנטת מקיפה אותו, וכל המגנטיות החזקה נמצאת בצפון, במערב ובצפון-מערב: בצד המאסף, אותו צד כמו סהר התוריום, ליד Ingenii — באותו צד, לא באותו מקום. במודל, החום מחק את המגנטיות במרכז; הברזל והחומר הכבד נישאו עם הנוזל, בכיוון הסיבוב, אל הצד המאסף ונותרו שם, ולכן המגנטיות נמצאת שם.

לירח אין כיום שדה מגנטי כלל-כוכבי, אבל חלקים מן הקרום שלו ממוגנטים: הם מחזיקים שדה חלש משלהם, שהוקפא בגרגרים נושאי ברזל כשהתקררו. כתמים אלה נקראים אנומליות מגנטיות בקרום. הם חשובים כאן משום שהם מתעדים היכן נמצא ברזל ממוגנט בקרום, והיכן חום מחק אותו מאוחר יותר. סעיף זה שואל רק היכן נמצא החומר הממוגנט סביב SPA. כיצד החומר מוגנט מלכתחילה — באיזה שדה התקרר — היא שאלה נפרדת, שנשארת לעבודה עתידית.

STEP 1 האנומליה

מודל השדה (Tsunakawa et al. 2015; Wieczorek 2018), T2015_449, מסונתז בגובה 25 ק"מ. בדיקת שחזור: ב-44.8° דרום 198.4° מזרח השדה הוא 0.85 ננו-טסלה, וחישוב בלתי תלוי נותן 0.852 ננו-טסלה ✓.

השדה נמדד ממסלול, במגנטומטרים על חלליות (Kaguya ו-Lunar Prospector) העוברות מעל פני השטח. מודל השדה מצרף את המעברים האלה למפה אחת ומחשב ממנה את השדה בכל מקום באותו גובה מעל פני השטח, כאן 25 ק"מ, כך שכל מקום מושווה במרחק שווה ממקורותיו. השדה נתון בננו-טסלה (nT), מיליארדית טסלה; שדות הקרום של הירח הם כמה ננו-טסלה עד כמה עשרות ננו-טסלה, חלק זעיר מן השדה על פני כדור הארץ. $|B|$ הוא עוצמת השדה, בלי תלות בכיוונו. בדיקת השחזור מראה שהחישוב שלנו של המודל שפורסם נותן אותו ערך כמו חישוב בלתי תלוי, 0.85 לעומת 0.852 ננו-טסלה, בנקודת בדיקה סמוך למינימום המכתשים.



איור B16.1. משמאל: השדה המגנטי של הקרום מעל SPA (מודל T2015_449, $|B|$ בגובה 25 ק"מ, סולם הצבעים נחתך ב-15 ננו-טסלה), עם שפת SPA, האזור המרכזי (15° ו-20° סביב מרכז הכיפה), הגזרה שבה נבדק סהר התוריום, הנקודות הנגדיות ל-Imbrium ול-Serenitatis, מרכז הכיפה, המסה העמוקה ואתר Chang'e-6. מימין: חלק השטח שבו $|B| > 5$ ננו-טסלה בטבעות סביב מרכז הכיפה (ליבה חלשה, טבעת ממוגנטת); בתמונה המשובצת, אותו חלק לפי גזרות בתוך 0°-40°.

במפה השמאלית, פנים המעגלים המרכזיים כהה, כמעט ריק משדה, ואילו הכתמים הבהירים מתקבצים למעלה משמאל, בצפון ובמערב. הגרף שמימין הופך זאת למספרים, ושתי הטבלאות שלהלן נותנות אותם. המדד פשוט: חלק הקרקע שעליה השדה עולה על 5 ננו-טסלה, רמה גבוהה בהרבה מן הרקע החלש של המרכז. המרחקים נתונים כזוויות על פני הירח ממרכז הכיפה (51.4° דרום, 196.8° מזרח; B5).

טבעת סביב מרכז הכיפה	שטח מעל 5 ננו-טסלה
10°-0	0.8%
20°-10	2.0%
30°-20	13.8%
40°-30	14.4%

טבלה: חלק השטח שבו $|B| > 5$ ננו-טסלה, בטבעות סביב מרכז הכיפה (B16).

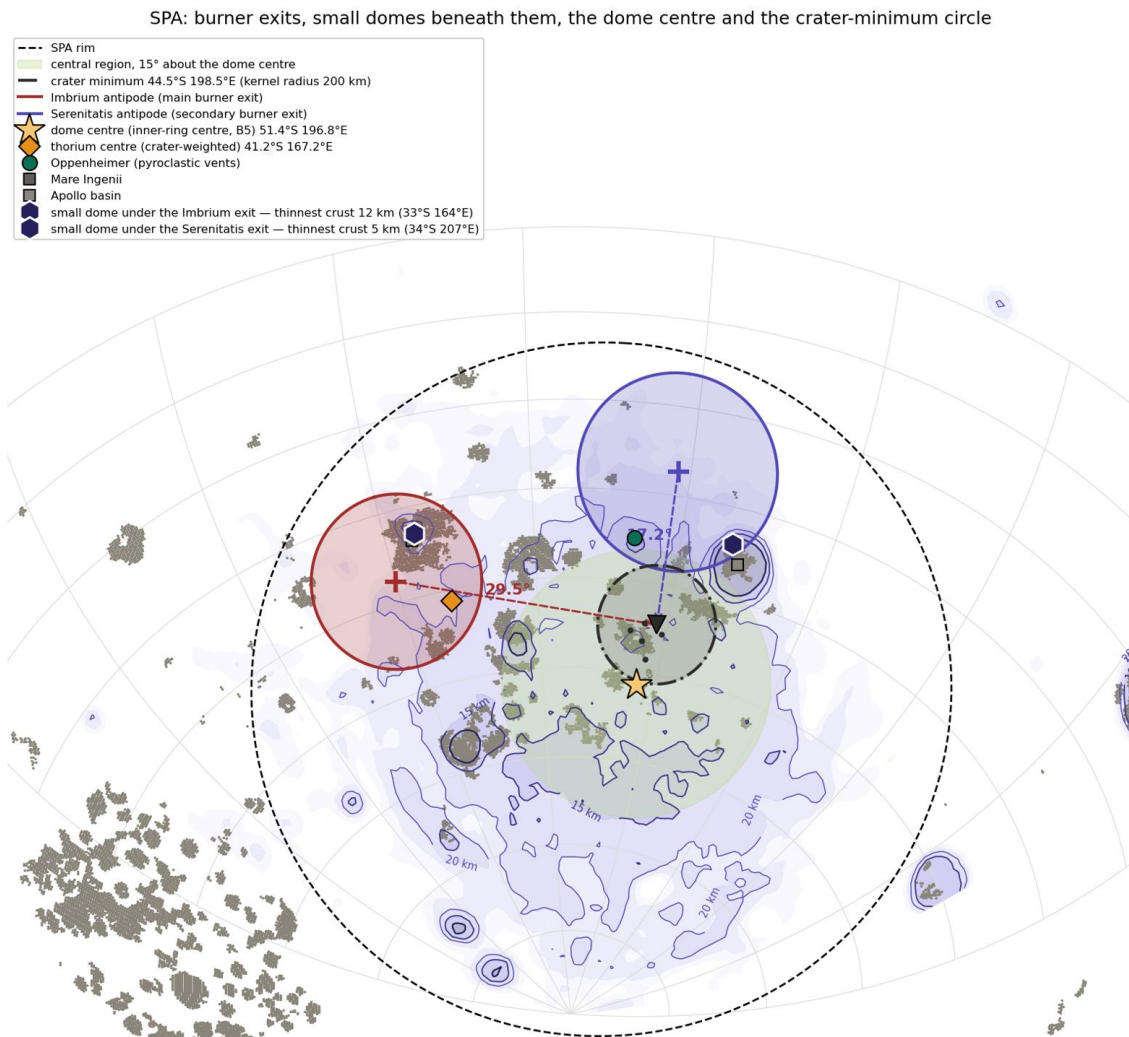
הטבלה הראשונה נקראת מן המרכז החוצה. ב-10° הפנימיות, פחות מאחוז אחד מן הקרקע ממוגנט מעל 5 ננו-טסלה; בטבעת הבאה, שני אחוזים; מעבר ל-20°, כשביעית מן הקרקע. המרכז כמעט חשוף, והקרקע הממוגנטת מתחילה בטבעת סביבו.

כיוון	מעגל 0°-40°	טבעת 20°-40° בלבד
צפון	31.7%	25.2%
מערב	34.1%	26.6%
צפון-מערב	42.2%	31.5%
מזרח, דרום-מזרח, דרום	0%	0%

חלק השטח שבו $|B| > 5$ ננו-טסלה בגובה 25 ק"מ.

הטבלה השנייה מחלקת את אותו שטח לפי כיוון. הקרקע הממוגנטת אינה פרושה באופן שווה סביב הטבעת: בצפון-מערב, 42.2% מן הטבעת מעל 5 ננו-טסלה; במזרח, בדרום-מזרח ובדרום — כלום. המגנטיות נמצאת בצד אחד.

ערכים נקודתיים: מרכז הכיפה 3.8 ננו-טסלה; מינימום המכתשים 1.9 ננו-טסלה; 0.9 Chang'e-6 ננו-טסלה; שיא של כ-22 ננו-טסלה ליד Mare Ingenii והנקודה הנגדית ל-Imbrium. הצד: במבט ממרכז הכיפה, הצד המוביל הוא מזרח-צפון-מזרח (76.7°), ולכן המגנטיות החזקה נמצאת בצד המאסף. על גוף מסתובב, הצד המוביל של נקודה הוא הצד הפונה אל כיוון הסיבוב, והצד המאסף הוא זה שמאחוריו, כמו אצל נוסע על קרוסלה מסתובבת: הצד המוביל לפניו, הצד המאסף מאחור. הצפון, המערב והצפון-מערב, שבהם נמצאת כל המגנטיות החזקה, נמצאים בצד המאסף.



Added: crust thickness (GRAIL model 1, Wieczorek et al. 2013) — purple shading and contours 10/15/20 km; hexagons = thinnest crust within 10° of each burner exit. Crater minimum 44.5°S 198.5°E (spherical kernel 200 km; dots = 150/250 km and LROC-only minima); 7.0° from the dome centre, 17.2° from the Serenitatis antipode, 29.5° from the Imbrium antipode. Lambert equal-area about 42°S 185°E; grey: maria (LROC).

איור 16.2.B. יציאות הברנר (הנקודות הנגדיות ל-Imbrium ול-Serenitatis), הכיפות הקטנות שמתחתן, מרכז הכיפה, מינימום המכתשים ומרכז התוריום, המוצגים כדי למקם את המגנטיות החזקה (ליד Ingenii). עובי הקרום מ- Wieczorek et al. (2013); באפור: ימות.

האיור ממקם את המגנטיות בין שאר המרכזים של המאמר. השדה החזק ביותר נמצא ליד Ingenii, מעל היציאה של הברנר העיקרי, וצפונית למרכז התוריום: שיאי המגנטיות נמצאים כ-8° צפונית למרכז התוריום. התוריום

והמגנטיות נמצאים באותו צד של SPA, הצד המאסף, אבל לא באותו מקום.

STEP 2 החידה

מדוע המרכז, המקום החם ביותר, כמעט נטול מגנטיות, ומדוע כל המגנטיות החזקה נמצאת בצד אחד, אותו צד כמו התורים?

STEP 3 מה אומר המדע

ברזל הגוף הפוגע: פגיעה אלכסונית מן הדרום פיזרה ברזל מתכתי על השפה הצפונית (Wieczorek et al. 2012), *Science* 335). הגברה בנקודות הנגדיות לאגנים גדולים בצד הקרוב (Lin et al. 1988; Mitchell et al. 2008); במרכז, חום ההתכה מחק את המגנטיזציה (מעל טמפרטורת Curie). טמפרטורת Curie היא הטמפרטורה שמעליה מינרל מגנטי מאבד את המגנטיזציה שלו; לברזל מתכתי היא כמה מאות מעלות, ולכן קרקע שחוממה מעבר לה והתקררה שוב אינה שומרת שום עקבות של המגנטיזציה הקודמת שלה. נושאי המגנטיזציה בשולי SPA: גבישי המטיט/מגהמיט בדגימות Chang'e-6 (Liu et al. 2025). השדה הממגנט: דינמו ירחי (Weiss & Tikoo 2014).

STEP 4 היכן המדע נופל

ההסבר דורש פגיעה בכיוון מסוים וגוף עשיר בברזל: הנחות שנבחרו כדי להתאים להתפלגות. הצירוף של מגנטיות, תורים ומערבולות בהירות (swirls) באותו צד אינו נגזר ממנגנון אחד. מקור האנרגיה לשדה חזק מליבה קטנה אינו פתור.

הכרעת המדע: מסביר בחלקו

המרכז החלש והשפה החזקה מקבלים כל אחד הסבר, אבל הצד והחפיפה שלו עם התורים נשענים על הנחות שנבחרו, ומקור השדה נשאר לא פתור.

STEP 5 מה אומר המודל

המודל עונה על שני חצאי החידה — המרכז החשוף והטבעת החד-צדדית — באותו חום ובאותו סיבוב שיצרו את סהר התורים (B9).

המרכז. החום מחק את המגנטיות. המרכז החם התקרר אחרון ותיעד מאוחר, בשדה חלש. המרכז חשוף אפוא משתי סיבות יחד: המגנטיזציה שהייתה בו חוממה מעבר לטמפרטורת Curie, וחלק גדול מן הברזל הקרוב לפני השטח שיכול היה לשאת מגנטיזציה חדשה נישא משם עם הזרימה (להלן).

הצד. החומר הכבד נע אל הסהר, בכיוון הסיבוב, ונותר שם. הברזל נישא עם הנוזל אל הצד המאסף, כמו התורים, ושם המגנטיות חזקה. המודל שומר על הובלת התורים עם הנוזל, משום שליד היציאה של Serenitatis אין ריכוז תורים (ממוצע 3.01 ppm, מקסימום 3.23 ppm, לעומת 4.27 ppm ליד היציאה של Imbrium); אילו בא התורים ישירות מן הברברים, היה עליו להתרכז גם שם. הברזל והתורים הוזזו באותה זרימה, אבל הברזל כבד ונותר מאחור היכן שהזרימה האטה, ואילו התורים נשאר בנוזל שהתפשט; זו הסיבה ששניהם נמצאים באותו צד ולא באותו מקום.

מקור הברזל: פנים כדור הארץ, דרך האגס (B10, B12, B14).

מה מגנט אותו: נשאר פתוח לעבודה עתידית. מאמר זה ממקם את הברזל; השדה שבו התקרר אינו חלק מן הטיעון שלו.

תצפית: השיא (כ-22 ננו-טסלה) נמצא ליד Ingenii, שנמצא גם ליד היציאה של Imbrium.

STEP 6 כיצד זה מתאים למודל

מה המודל אומר	מה נמצא
המרכז נמחק	0–10°: 0.8%; 10–20°: 2.0% ✓
הברזל נע אל הצד המאסף ונותר שם	צפון/מערב/צפון-מערב 32–42% (טבעת), מזרח/דרום 0%; הצד המאסף ✓
אותו צד כמו התורים	סהר התורים: צפון-מערב ✓
ברזל מפנים כדור הארץ	✓ B10, B12, B14

טבלה: ציפיות המודל מול מדידות השדה המגנטי (B16).

הכרעת המודל: מתאים

המרכז שנמחק, המגנטיות החזקה בצד המאסף והחפיפה שלה עם סהר התורים נובעים מתהליך אחד: ברזל וחומר כבד שנישאו עם הנזול ונותרו שם.

נתונים וקוד. מודל השדה (Tsunakawa et al. 2015, doi: 10.1002/2014JE004785; Wieczorek et al. 2012 (doi: 10.1126/science.1214773); Weiss & Tikoo 2014 (doi: 10.1126/science.1246753); Zhang et al. 2025 (doi: 10.1126/science.1214773); Zenodo 3873648); (B16_2026-10-05 (תיקיה B25_spa.npz ו-run.py, field.py); בדיקה בלתי תלויה: הדוח Lunar Magnetism Test.pdf.

B17 המערבולות הבהירות

בקצרה. בתוך SPA המערבולות הבהירות (swirls) נמצאות ב-Mare Ingenii, בתוך סהר התורים, מעל שדה מגנטי חזק. ב-Mare Moscoviense יש זרימות לבה, אבל אין שדה חזק ואין מערבולות. במודל, מערבולת בהירה היא זרימה של שני חומרים שקפאו לפני שהתערבבו — ברזל מלמטה, אלומיניום וסיליקה מלמעלה. Moscoviense היה ים פעיל: הברזל שלו יכול היה לשקוע, והוא פשוט קפא. SPA לא היה ים פעיל: דבר לא הובא מלמטה, ולכן לא היה מנגנון שבו הברזל שלו ישקע; הוא חומם והתקרר, והברזל שלו נשאר והתרכז כשחומרים אחרים עזבו.

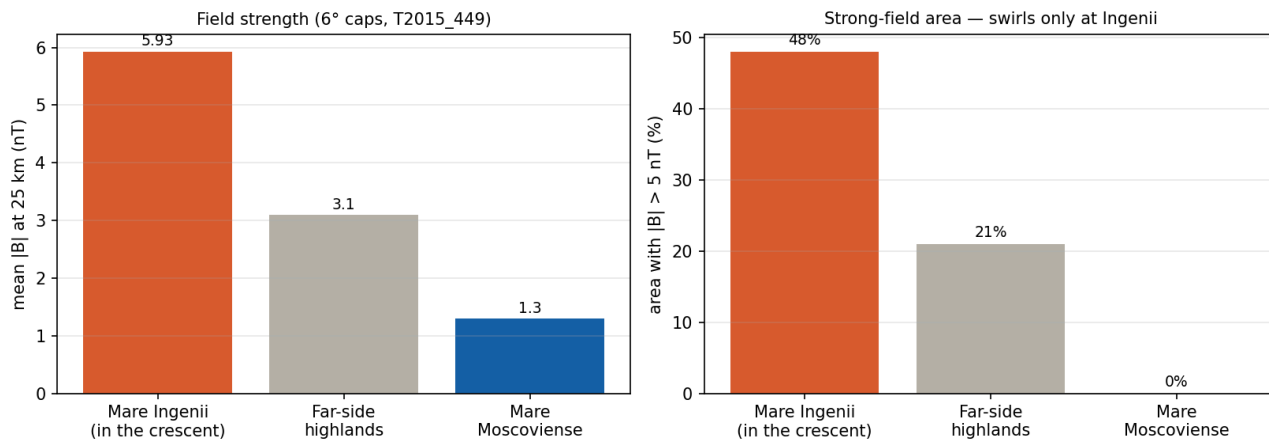
סעיף זה נובע ישירות מ-B16: המערבולות הבהירות הן התכונה היחידה של פני הירח שאפשר לראות בעין ושבמצאת רק היכן שהקרום ממוגנט חזק. לכן הן מראות, על פני השטח, היכן נמצא הברזל הממוגנט.

STEP 1 האנומליה

מה הן. כתמים בהירים ומפותלים בלי תבליט, המתחלפים עם נתיבים כהים, בקנה מידה של 1–5 ק"מ; מכתשים צעירים חוצים אותם בלי לשבור את הדפוס. כל מערבולת בהירה יושבת על אנומליה מגנטית. תמונות: LROC, *The Swirls of Mare Ingenii*; Reiner Gamma (NASA SVS).

מערבולת בהירה נראית כמו דפוס של חלב שנמזג לקפה ונשאר בלי ערבוב: רצועות ולולאות חיוורות ומתעקלות, עם נתיבים כהים ביניהן, מצוירות על קרקע שטוחה. "בלי תבליט" פירושו שלדפוס אין גובה משלו: זה דפוס של בהירות, לא של גבעות ועמקים. משום שמכתשים צעירים חותכים אותו והדפוס נמשך בצדם השני, הוא אינו שכבה שמכתש יחיד יכול לשבור; הוא קשור למשהו שנמצא מתחת לפני השטח לאורך כל האזור.

השדה מעל SPA מוצג באיור B16.1: Ingenii נמצא בתוך הסהר, ליד הנקודה הנגדית ל-Imbrium.



איור B17.1. השדה המגנטי בשלושה מקומות (כיפות של 6°, גובה 25 ק"מ, מודל T2015_449): $|B|$ הממוצע (משמאל) וחלק השטח שבו $|B| > 5$ ננו-טסלה (מימין) ב-Mare Ingenii (בסהר), ברמות הצד הרחוק וב-Mare Moscoviense.

ההשוואה בנויה כמבחן עם ביקורת. Ingenii הוא ים בצד הרחוק עם זרימות ומערבולות; Moscoviense הוא ים בצד הרחוק עם זרימות משלו; רמות הצד הרחוק הן קרקע בלי ים. אילו זרימה לבדה הייתה יוצרת שדה חזק, שני הימות היו דומים. הם אינם דומים.

מקום	זרימת לבה	שדה ממוצע	שיא (ננו-טסלה)	שטח מעל 5 ננו-טסלה	מערבולות
Mare Ingenii (בתוך הסהר); 27.5° ממרכז SPA, בכיוון (304°)	✓	ננו-טסלה 5.9	22.7	48%	✓
רמות הצד הרחוק (10° צפון 180° מזרח)	—	ננו-טסלה 3.1	12.3	21%	—
Mare Moscoviense	✓	ננו-טסלה 1.3	3.6	0%	✗

בדיקת שחזור: סינתזה של מודל (Tsunakawa et al. 2015; Wieczorek 2018) T2015_449 נותנת 0.85 ננו-טסלה ב-44.8° דרום 198.4° מזרח, כמו ב-Moscoviense. ✓ B16: לבות עשירות בברזל ובטיטניום, הקרום הדק ביותר על הירח, ליתולוגיות של אוליבין-פירוקסן-ספינל (Kramer et al. 2010; doi: 10.1016/j.icarus.2017.10.009; Bhatt et al. 2018; Kramer et al. 2008).

הטבלה נקראת לאורך העמודות. ל-Ingenii שדה ממוצע של 5.9 ננו-טסלה, וכמעט מחצית מן הקרקע שלו מעל 5 ננו-טסלה; ל-Moscoviense, עם זרימות לבה והקרום הדק ביותר על הירח, 1.3 ננו-טסלה, ושום חלק מן הקרקע שלו אינו מעל 5 ננו-טסלה — חלש אפילו מן הרמות שאין בהן ים כלל. מבין השלושה, רק ל-Ingenii יש מערבולות.

סיבוב זרימה צמיגה: מספר Ekman, ללבה של כ-100 פסקל-שנייה, בשלושה קני מידה של זרימה. ערך מתחת ל-1 פירושו שהסיבוב מסיט את הזרימה. מספר Ekman משווה בין שתי השפעות על נזל נע: החיכוך הפנימי של הנזל (הצמיגות שלו), השומר על הזרימה ישרה בכיוון שבו היא נדחפת, והסיבוב של הגוף שמתחתיה, המכופף את הזרימה הצידה. הוא גדל עם הצמיגות וקטן עם סיבוב מהיר יותר ועם ריבוע גודל הזרימה. בטבלה הדבר ניכר

כירידה פי מאה בכל צעד של פי עשרה בקנה המידה, וכירידה ככל שהסיבוב נעשה מהיר יותר, מן השורה התחתונה אל העליונה.

סיבוב	100 מ'	1 ק"מ	10 ק"מ
מחובר, 5.77 שעות	0.012	0.0001	0.000001
פעם ביומיים	0.10	0.001	0.00001
פעם ב-5 ימים	0.24	0.002	0.00002
היום, 27 ימים	1.3	0.013	0.0001

טבלה: מספר Ekman לפי קצב הסיבוב וקנה המידה של הזרימה (B17).

שורת החיבור משתמשת ביום כדור הארץ בשחרור של הסדרה, 5.77 שעות (מאמר 2, B.1§; גרסה קודמת השתמשה ב-6.6 שעות ונתנה 0.013 ב-100 מ'). המספר גדל ביחס ישר לאורך היום, ולכן שאר השורות נגזרות מן הראשונה; גרסה קודמת נתנה 0.09 ו-0.0009 ליומיים ו-0.23 לחמישה ימים. כל הערכים מתחת ל-1 מלבד אחד: זרימה ברוחב 100 מ' תחת הסיבוב האיטי של היום. בזרימות של קילומטר ומעלה, הסיבוב מכופף את הזרימה בכל קצב סיבוב שבטבלה, משלב החיבור ועד היום.

STEP 2 החידה

מדוע המערבולות הבהירות של הצד הרחוק מתקבצות סביב SPA, ובתוכו דווקא בסהר, ומדוע ים אחר, עם זרימות לבה משלו, אין בו מערבולות?

STEP 3 מה אומר המדע

השדה המגנטי של הקרום מסיט את רוח השמש; מתחתיו הקרקע מתבלה לאט ונשארת בהירה. לפי המודלים, שדה השוכב לאורך הקרקע נותן לולאות בהירות, ושדה אנכי נותן נתיבים כהים. מקורות השדה חייבים להיות צרים ורדודים, דייקים (עורקי מאגמה) או צינורות לבה, וממוגנטים חזק בהרבה מכל דגימת Apollo (Hemingway) (Tikoo 2018). הוצעו גם מיון של אבק דק ופגיעת שביט.

רוח השמש היא זרם של חלקיקים טעונים מן השמש. היכן שהיא פוגעת בקרקע החשופה, היא מכה את פני השטח לאט ("בליה חללית"); היכן ששדה מקומי מסיט אותה, הקרקע נשארת רעננה ובהירה, כפי שחלק של רצפה מתחת לשטיח נשאר לא דהוי בחדר מואר שמש. דייק (עורק מאגמה) הוא יריעה אנכית של חומר שהיה מותך ושחתך את דרכו מעלה דרך הקרום; צינור לבה הוא תעלה שבה זרמה לבה מתחת לגג קפוא.

STEP 4 היכן המדע נופל

מניין בא הברזל המתכתי, הממוגנט חזק יותר מכל חומר שנדגם, אינו מוסבר. מדוע המערבולות של הצד הרחוק מתקבצות סביב SPA, ומדוע ימות אחרים עם זרימות (Moscoviense) חסרים שדה ומערבולות, אינו נגזר.

הכרעת המדע: מסביר בחלקו

מנגנון הבהירות מוסבר; מקור הברזל ומיקומו אינם מוסברים.

STEP 5 מה אומר המודל

המודל אינו נכנס למגנטיות: ההסבר של הבהירות בשדה המגנטי וברוח השמש (STEP 3) שייך לספרות ואינו נלקח כאן. המודל קורא את המערבולות לפי החומרים שלהן: ממה עשויים הבהיר והכהה, כיצד הם סודרו, ומדוע

הם נמצאים כאן.

מה הם הבהיר והכהה. המודל קורא את הכהה כברזל ואת הבהיר כאלומיניום וסיליקטים: שני חומרים שקפאו לפני שהתערבבו, והאפור הוא המצב המעורב; הסיליקה באה מלמעלה והברזל מלמטה. המדידות:

אתר	FeO בהיר / רקע (%) משקלי, (Clementine)	הרכב
Reiner Gamma	15.7 / 18.8–19.4	הבהיר עשיר בפלגיוקלז, CaO , Al_2O_3 , MgO ; עני ב- FeO , TiO_2 ובמינרלים כהים (Hu et al. 2024) ✓; גם מרקם הקרקע שונה
Mare Ingenii	14.1 / 16.2	פחות ברזל בבהיר ✓; אבל הפירוקסן אינו עוקב אחר המערבולת (Kramer et al. 2011)
Descartes	4.5 / 5.8–6.1	פחות ברזל בבהיר
Gerasimovich	5.9 / 5.7–5.8	אין הבדל

הסתייגות: שיטת המדידה של ברזל ממסלול יכולה להטעות דווקא במערבולות הבהירות (בליה חללית חריגה נראית כמו "פחות ברזל"; Blewett et al. 2011).

FeO הוא ברזל הנתון כמשקל התחמוצת שלו, באחוזים ממשקל חומר פני השטח (%) משקלי, כפי שנמדד ממסלול בחללית Clementine. כל שורה משווה מערבולת בהירה לקרקע שסביבה. בשלושה מארבעת האתרים החלק הבהיר מחזיק פחות ברזל מסביבתו; ב-Gerasimovich אין הבדל. ההסתייגות חשובה: השיטה המסלולית מסיקה את הברזל מן הצבע, ואותה בליה איטית ששומרת על בהירות המערבולות יכולה לגרום להן להיראות ענייית בברזל יותר משהן באמת. מבחן: החומר שנחפר בידי מכתשים קטנים וצעירים בתוך לולאה בהירה, בהשוואה לנתיב כהה. אם הבהיר עשיר באלומיניום גם מתחת לפני השטח, והכהה בברזל, הדפוס נמצא בחומר עצמו ולא רק בבליה.

זרימה שקפאה לפני שהתערבבה. המודל קורא את המערבולות הבהירות כזרימה של חומרים שבה הערבוב היה חלש: החומר קפא לפני שהתערבב לגמרי. רק לבה עולה. גרגרים מוארכים עומדים זקופים במהלך העלייה ושוכבים ביציאה, בגלל הקור או בגלל כיוון הזרימה. בפתח הזרימה הופכת מאנכית לאופקית, והגרגרים המוארכים נשכבים איתה; הקור מקפיא אותם במקומם. לחלק מן הגרגרים היה זמן להישכב ולחלקם לא. גרגרים מוארכים בנוזל נע מתיישרים עם הזרימה, כפי שבולי עץ בנהר מסתובבים כך שיצביעו במורד הזרם; גרגר שקופא עומד שומר את רישום הזרימה העולה, גרגר שקופא שוכב את רישום ההתפשטות. הטבלה עוקבת אחר הלבה מן התעלה אל פני השטח.

היכן	הזרימה	הגרגרים	מה נראה
בתעלת ההזנה, בעלייה	אנכית	זקופים	נתיב כהה: ברזל מלמטה
ביציאה ובהתפשטות	אופקית, ואחר כך קפואה	שוכבים	לולאה בהירה: אלומיניום וסיליקה מלמעלה

טבלה: הלבה מן תעלת ההזנה אל פני השטח — כיוון הגרגרים ומה שנראה (B17).

הטבלה קוראת את הדפוס כרישום של הזרימה עצמה: היכן שהחומר עלה, הברזל מלמטה נשאר בנתיב; היכן שהתפשט ונח, החומר הקל מלמעלה נשכב מעליו. הקריאה המאגנטית של אותו דפוס (STEP 3) שייכת לספרות ואינה נלקחת כאן.

הסיבוב. ייתכן שהסיבוב הוא שהשכיב את הגרגרים; אפילו סיבוב אחד בכמה ימים הוא מהיר לצורך זה. זה נבדק במספרי Ekman שלמעלה: בזרימות של קילומטר ומעלה, הסיבוב מסיט את הזרימה בכל מצב, גם אחרי הניתוק.

מדוע אין מערבולות ב-Moscoviense. Moscoviense היה ים פעיל: חומר עלה ושקע חזרה דרכו, והברזל שלו יכול היה לשקוע מטה; כשנרגע הוא פשוט קפא, ואין בו לא שדה ולא מערבולות. גם SPA קיבל חום, אבל הוא לא היה ים פעיל: דבר לא הובא דרכו מלמטה, ולכן לא היה מנגנון שבו משהו ישקע. החומר שבמקום חומם, התבשל והשתנה; היו חימום ואחריו קירור. הברזל שהיה שם נשאר, וכשהחומרים האחרים עזבו הוא התרכז, ונוצר ריכוז של ברזל ב-SPA (B10, B12, B14); חלק ממנו נישא עם הזרימה אל הסהר (B16), שם נמצאות המערבולות של Moscoviense. Ingenii הוא ההשוואה שמראה את ההבדל: היו בו זרימה, לבה עשירה בברזל והקרום הדק ביותר, אבל כים פעיל הברזל שלו שקע.

STEP 6 כיצד זה מתאים למודל

מה המודל אומר	מה נמצא
המערבולות הבהירות של SPA נמצאות בסהר, לשם נע הברזל	Ingenii בתוך הסהר ✓
ברזל מרוכז ב-SPA; ב-Moscoviense הברזל שקע	Ingenii 5.9 ננו-טסלה / 48% Moscoviense 1.3 ננו-טסלה / 0% ✓
ים פעיל שקפא אינו נותן מערבולות	Moscoviense: זרימות כן, מערבולות לא ✓
כהה = ברזל מלמטה, בהיר = אלומיניום וסיליקה מלמעלה	פחות ברזל בבהיר בשלושה מארבעה אתרים (Reiner Ingenii, Gamma, Descartes) ✓

טבלה: ציפיות המודל מול מדידות המערבולות הבהירות (B17).

הכרעת המודל: מתאים

המערבולות הבהירות מופיעות היכן שזרימה של שני חומרים קפאה מעל הברזל המרוכז ב-SPA, בסהר ב-Ingenii, ונעדרות ב-Moscoviense, ים פעיל שהברזל שלו שקע ושפשוט קפא.

נתונים וקוד. מודל השדה (Tsunakawa et al. 2015, doi: 10.1002/2014JE004785; Wiczorek 2018, Zenodo 3873648); מקורות צרים, רדודים וממוגנטים חזק: Hemingway & Tikoo 2018, JGR Planets; שדה אופקי = בהיר, אנכי = כהה, וההדמיה של Reiner Gamma: Hemingway & Garrick-Bethell 2012; Deca et al. 2020; ההרכב של Moscoviense: Kramer et al. 2008, Bhatt et al. 2018, Kramer et al. 2010.

פתוח. ניבויים: הלולאות הבהירות נמצאות בשולי זרימות הלבה, היכן שהזרימה נעצרה, והנתיבים הכהים מעל תעלות ההזנה. אם הסיבוב הוא שהשכיב את הגרגרים, כיווני השכיבה (המוסקים מצורת המערבולות) מקבילים; אם הזרימה עשתה זאת, הם מפוזרים. דגימה מ-Moscoviense תראה מעט ברזל מתכתי ויותר חמצן זמין מאשר ב-SPA. Gerasimovich (כ-23° דרום 237° מזרח, מחוץ לשפת SPA, ליד הנקודה הנגדית ל-Crisium) ו-Firsov (כ-4° צפון 112° מזרח) הן מערבולות בהירות בצד הרחוק, רחוקות מן הסהר; מקור הברזל שם פתוח (הקואורדינטות טעונות אימות). גילן של לבות Ingenii, לפני 3.87 מיליארד שנים או אחריו, פתוח.

בקצרה. שבע-עשרה אנומליות. המדע מסביר שש במלואן, תשע בחלקן, אחת בקושי, ואחת כלל לא. המודל מתאים לשש-עשרה, ולאחת בחלקה (B14, שהאיזוטופים יכריעו בה). המדידות מסודרות סביב מרכז אחד — מקור חום אחד, ארוך-טווח — ולא סביב מכה קצרה אחת מבחוץ.

הסעיפים B1 עד B17 הסתיימו כל אחד בשתי הכרעות: עד כמה הקריאה המקובלת של המדע מסבירה את האנומליה, ועד כמה המודל מתאים לה. סעיף זה מציב את כל שלושים וארבע ההכרעות זו לצד זו, כדי שהקורא יוכל לראות את האגן כולו בבת אחת.

כיצד לקרוא את הטבלה. כל שורה היא אנומליה אחת. "מה נמדד" נותן את המספרים המרכזיים של הסעיף שלה. העמודה "המדע" נותנת את הכרעת הקריאה המקובלת, בסולם של ארבע דרגות: **מסביר** (ירוק בהיר), **מסביר בחלקו** (כתום בהיר), **מסביר בקושי** (כתום עמוק יותר) ו**אינו מסביר** (אדום). העמודה "המודל" נותנת את הכרעת המודל בסולם של שתי דרגות: **מתאים** (ירוק) ו**מתאים בחלקו** (כתום). הצבעים נעים בכיוון אחד: מירוק, היכן שהמדידה מוסברת, דרך כתום, אל אדום, היכן שאינה מוסברת. העמודה האחרונה אומרת, בשורה אחת, כיצד המודל מסביר את האנומליה. קראו לאורך שתי עמודות ההכרעה: עמודת המדע מחליפה צבע משורה לשורה; עמודת המודל נשארת ירוקה, מלבד בשורה אחת.

אנומליה	מה נמדד	המדע	המודל	המודל, בשורה אחת
B1 תיעוד המכתשים	חוסר המרוז במרכז, 0.51°; מינימום ב-45.4° דרום 197.9° מזרח, עוצמת תיעוד 0.45; -20 40 ק"מ 0.47 לעומת 10-20 ק"מ 0.91; מכתשים רדודים ב-18%, עם שפות גבוהות	אינו מסביר	מתאים	חום מלמטה מחק והרפה את המכתשים; קרקע דחוסה, שפות גבוהות; המינימום מדרום ליציאה של Serenitatis, על קו האורך שלה
B2 צורה ועומק	האזור הנמוך ביותר בירח; רצפה ב-4.8 ק"מ, עומק 6-9 ק"מ; שארית של -1.1 עד -1.8 ק"מ במרכז	מסביר	מתאים	כיפה שקרסה; הדחיסה החזקה ביותר במרכז, ונחלשת לעבר השפה
B3 קרום דק	הקרום הדק ביותר; לא עגול; הדק ביותר ב-Apollo	מסביר	מתאים	הקרום החליק מן הכיפה; הבסיס נמס; כיפות קטנות מעל היציאות (Ingenii, Apollo)

B4	הטבעת החיצונית	קרום מעובה, אסימטרי – עבה למזרח (7.8 ק"מ לכיוון 97°)	מסביר בחלקו	מתאים	החומר שהחליק מן הכיפה נערם בשוליים
B5	הטבעת הפנימית	מרכז ב-51.4° דרום 196.8° מזרח (מרכז הכיפה), 118 ק"מ מזרח-צפון-מזרח למרכז האליפסה	מסביר בחלקו	מתאים	שולי הכיפה; 29° מן היציאה של Imbrium, 24° מן היציאה של Serenitatis
B6	צפיפות ונקבוביות	נקבוביות שנסגרו בעומק, ביותר במרכז	מסביר בחלקו	מתאים	דחיסה בחום
B7	רצפה חריגה	רצפה עשירה בפירוקסן וברזל; תוריום בצורת סהר	מסביר	מתאים	אגם התכה מדרום ליציאות; הנוזל נישא אל הצד המאסף
B8	מעט לבה נראית	כ-4% ים בכל SPA; יותר במרכז	מסביר בחלקו	מתאים	חימום והתכה מלמטה, לא התפרצות על פני כל האגן
B9	בזלות קבורות והים המרכזי	לבה קבורה במרכז; סהר תוריום חד-צדדי, 32°–12	מסביר	מתאים	ים מרכזי, שחומם עם האזור ונמחק; הנוזל הוסט בידי הסיבוב אל הצד המאסף (הדמיה ב-5.77 שעות)
B10	המסה הצפופה	עודף מסה עמוק (James et al. 2019) מדרום לכיפה	מסביר בחלקו	מתאים	ברזל מפנים כדור הארץ, שהתרכז במקומו בחימום ובקירור; לא ים פעיל, ולכן דבר לא שקע
B11	אובדן חומרים נדיפים	מעטפת ענייה בחומרים נדיפים, ברזל כבד איזוטופית	מסביר בחלקו	מתאים	חום ממושך ואידוי
B12	מעטפת ענייה בחמצן	$\Delta 1.93\text{IW}$ – לעומת -0.80	מסביר בחלקו	מתאים	החום מגרש חמצן; ברזל מתכתי צורך אותו
B13	מקור מדולדל	מקור בזלת עתיק ומדולדל	מסביר	מתאים	יצא מכדור הארץ עשיר והתדלדל בחום

B14	מתכת בנוריטים	Ni/Co; גרגרי ברזל-ניקל; גילים 3.873-4.247 מיליארד שנים	מסביר	מתאים בחלקו	חומר ארצי; האיזוטופים יכריעו
B15	געשיות ממושכת	3.87 → 4.25 → 3.2-3.6 → 2.2-2.8 מיליארד שנים	מסביר בקושי	מתאים	ברנר אחד, שנגרע לפני השחרור; חום שיורי אחריו; השיא הנראה 3.2-3.6 הוא מה שנשאר חשוף
B16	מגנטיות	מרכז 0.8% מעל 5 ננו-טסלה; טבעת 14%; צפון-מערב 42%; מזרח ודרום 0%	מסביר בחלקו	מתאים	המרכז נמחק; הברזל נישא אל הצד המאסף ונותר שם; מי מגנט אותו: עבודה עתידית
B17	מערבולות בהירות	Ingenii: שדה של 5.9 ננו-טסלה לעומת 1.3 ב-Moscoviense	מסביר בחלקו	מתאים	זרימה של שני חומרים שקפאה לפני שהתערבבה; Moscoviense, ים פעיל, קפא בלי מערבולות

טבלה: שבע-עשרה האנומליות של SPA — הכרעת המדע והכרעת המודל (B18).

הספירה שלהלן מסכמת את שתי עמודות ההכרעה. היא נקראת לרוחב: מימין, כיצד מתחלקות שבע-עשרה האנומליות לפי הקריאה של המדע; משמאל, כיצד הן מתחלקות לפי המודל.

הכרעת המדע	אנומליות	הכרעת המודל	אנומליות
מסביר	6	מתאים	16
מסביר בחלקו	9	מתאים בחלקו	1
מסביר בקושי	1		
אינו מסביר	1		

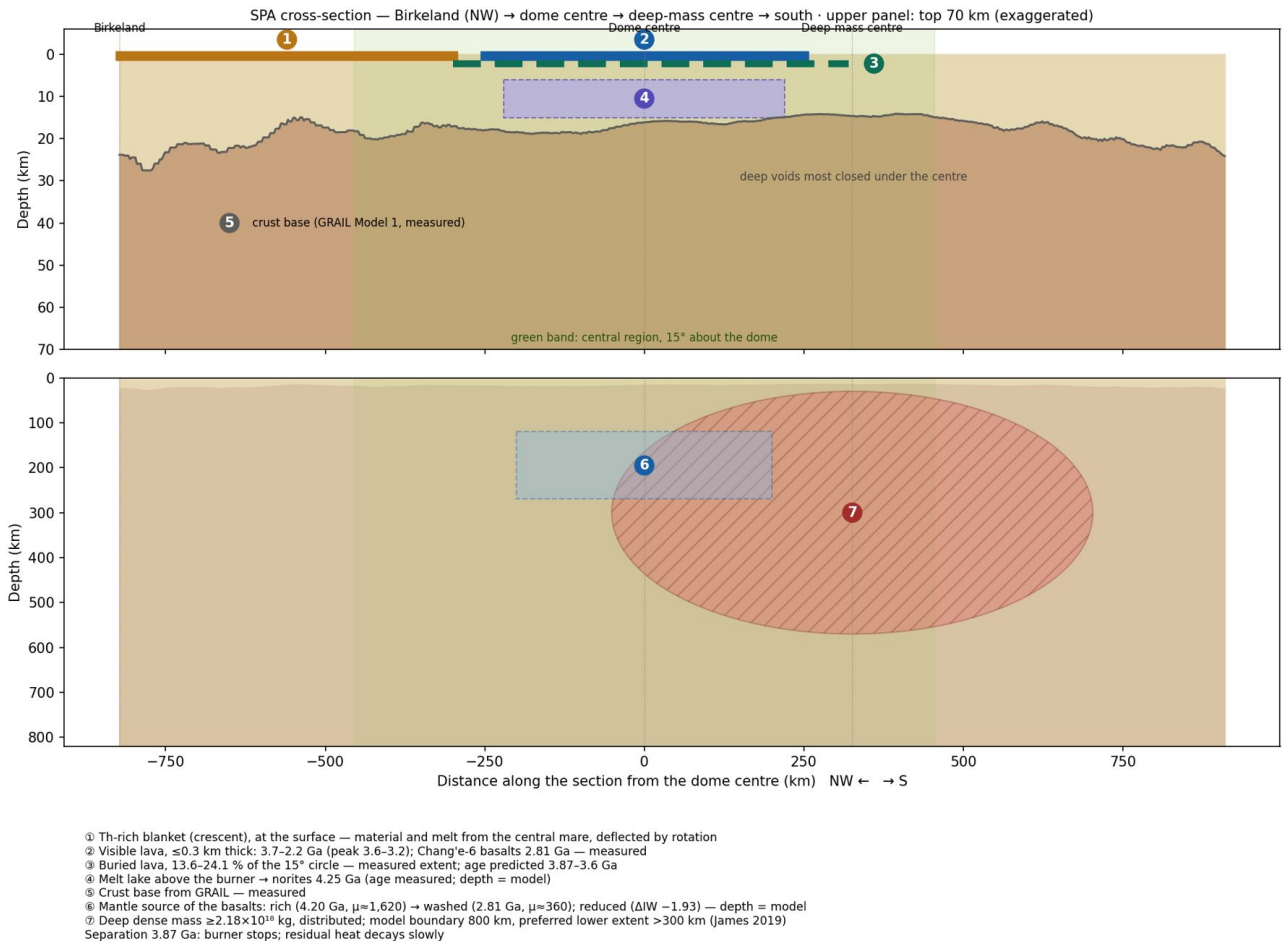
טבלה: סיכום ההכרעות — המדע מול המודל (B18).

ההבדל בין שתי העמודות אינו שלמדע אין תשובות: הוא מסביר שש אנומליות במלואן ותשע בחלקן. ההבדל הוא באופן שבו התשובות בנויות. המדע נותן לכל אנומליה תשובה משלה — כיוון אלכסוני כאן, פגיעה שנייה שם, מקור נפרד במעטפת במקום אחר — והתשובות אינן נגזרות זו מזו. המודל נותן לכל שבע-עשרה סיבה אחת, והשורה היחידה שבה הוא מתאים רק בחלקה, B14, היא זו שהאיזוטופים של המתכת יכריעו בה (חלק F).

מרכז אחד. אילו היה SPA סימן של התנגשות אחת, ההתנגשות הייתה אמורה לערבב הכול באופן אחיד. מכה קצרה אחת אינה מסדרת כל מדידה — עומק, קרום, טבעות, ברזל, חמצן, תוריום, לבה קבורה, גילים, מגנטיות — סביב מרכז אחד ובשכבות לפי עומק; מקור חום אחד, ארוך-טווח וממורז, כן מסדר. המדע עונה על כל חלק: יריעת ההתכה התמיינה לשכבות; עומק החפירה משתנה מן המרכז אל השפה; פגיעה אלכסונית נותנת

אסימטריה. כל תשובה מסבירה חלק; אף אחת אינה מסבירה את כל השכבות, את טווח הגילים הארוך (4.25 עד 2.2 מיליארד שנים), ואת המגנטיות והתוריום באותו צד — באותו צד, לא באותו מקום.

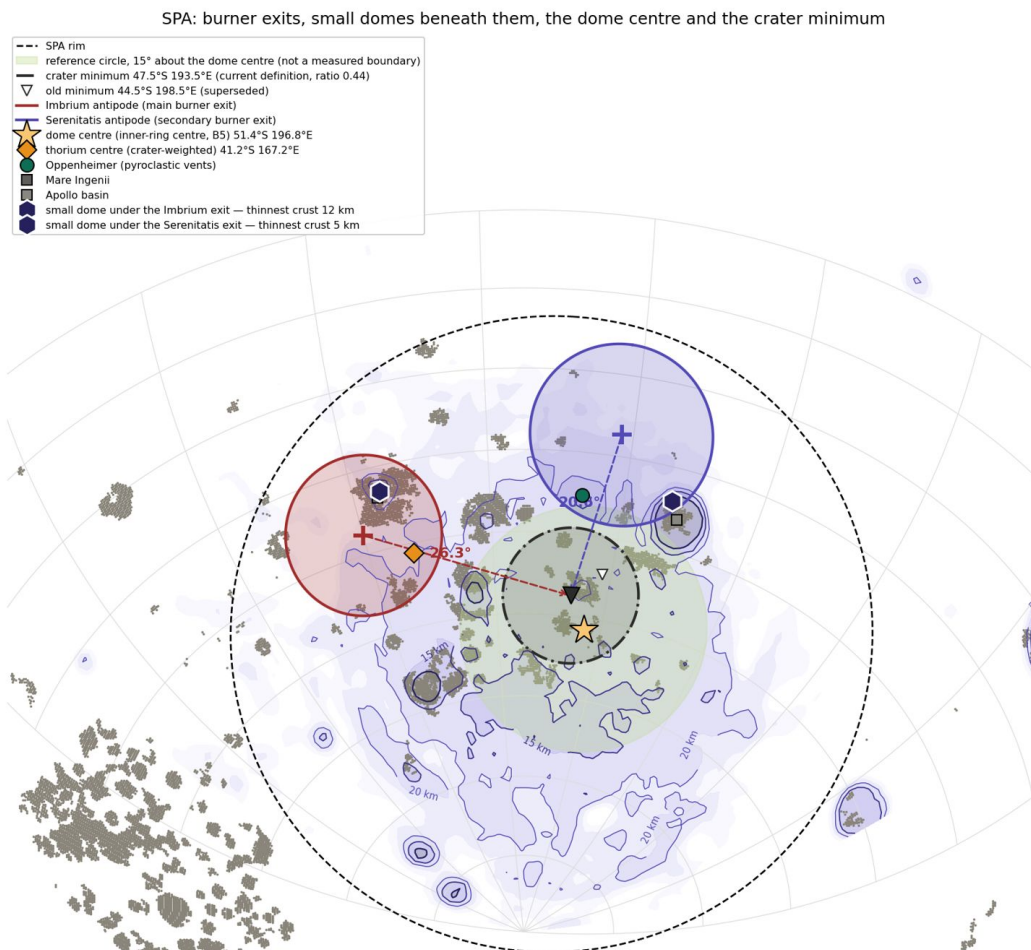
השוואה מן היום-יום: בחישה חזקה אחת בסיר מרק משליכה את תוכנו פעם אחת, באקראי; להבה הנשמרת מתחת לסיר זמן רב מצמצמת אותו בדפוס סביב הנקודה החמה ביותר: המים מתאדים, החומר הכבד נשאר ומסמך, והקצף מתאסף בשוליים. SPA נראה כמו המקרה השני.



איור B18.1. חתך דרך SPA: שבעה רכיבים, הנמדדים מול המודל, עם הגילים.

החתך מציב שבעה מן הרכיבים שנמצאו ב-B1–B17 בחיתוך אחד דרך האגן, כל אחד עם המדידה שלו והגיל שלו, כך שאפשר לראות בתמונה אחת את סידורם סביב מרכז אחד ובשכבות לפי עומק.

התמונה כולה. החום נכנס דרך שני ברנרים של הצד הקרוב — Imbrium, העיקרי, ו-Serenitatis, המשני. מעל כל יציאה, בצד הרחוק, כיפה קטנה של קרום דק: Ingenii (12–16 ק"מ) ו-Apollo (5–9 ק"מ). מדרום ליציאות נמצאים הכיפה הגדולה והמרכז החם: מרכז הכיפה, הקרום הדק הרחב, מינימום המכתשים והמסה הצפופה. בצד המאסף, בצפון-מערב, נמצא הסהר: תוריום, מגנטיות ומערבולות בהירות — באותו צד, כששיאי המגנטיות נמצאים כ-8° צפונית למרכז התוריום. כל המרכזים, עם היציאות והכיפה לפני ההתעגלות ואחריה, מוצבים על מפה אחת באיור C.1.



Crust thickness: GRAIL model 1 (Wieczorek et al. 2013), contours 10/15/20 km. Crater minimum 47.5°S 193.5°E (current definition): 4.5° from the dome centre, 20.6° from the Serenitatis exit, 26.3° from the Imbrium exit. Lambert equal-area about 42°S 185°E; grey: maria (LROC).

איור B18.2. התמונה כולה: היציאות של שני הברנרים, הכיפות הקטנות שמעליהן, מרכז הכיפה והמרכז החם מדרום להן, והסהר בצד המאסף.

המפה נקראת מצפון לדרום: שתי היציאות למעלה, הכיפה והמרכז החם מתחתן, והסהר בצד, בצד המאסף. חלק C ממשיך מן הסידור הזה ושואל כיצד הגיעו הנקודות למקום שבו הן נמצאות היום, כשהצורה השתנתה מן הצורה הפחוסה אל הכדור.

פתוח. צירי הזמן — האם ציר כדור הארץ השתנה אחרי הניתוק (C.4; עבודה עתידית). B14: האיזוטופים יכריעו. B11: שתי שאלות פתוחות.

חלק C — הנקודות האנטיפודיות: מצורה פחוסה לכדור

חלק B מדד את האגן תכונה אחר תכונה. חלק C שואל היכן התכונות האלה נמצאות ביחס לצד הקרוב, ומה עשה שינוי בצורת הירח ליחס הזה. הרעיון המרכזי הוא **הנקודה האנטיפודית**. הנקודה האנטיפודית של נקודה על גוף היא הנקודה שמולה בדיוק: מותחים קו מן הנקודה דרך מרכז הגוף וממשיכים אותו עד שהוא יוצא מפני השטח בצד השני. על כדור, הנקודה האנטיפודית של נקודה בקו רוחב φ צפון ובקו אורך λ נמצאת בקו רוחב φ דרום ובקו אורך $180^\circ + \lambda$. ל-Imbrium, למשל, הנמצא ב- 37° צפון, 341.5° מזרח, הנקודה האנטיפודית היא 37° דרום, 161.5° מזרח.

שאלת החלק הזה נובעת מן ההצעה. אילו פתחי הצד הקרוב היו יוצרים את SPA ישירות, האגן היה אמור לשקף אותם בצד הרחוק. חלק זה מציב את הנקודות שמול Imbrium ומול Serenitatis, מעתיק את הטבעות ואת הימות שלהם לצד הרחוק ומשווה את ההעתק לקו המתאר של SPA (C.1–C.2). ההעתק אינו משחזר את האגן, והתוצאה נשמרת: היא מסמנת מה הברנר הוא ומה אינו — הוא קובע היכן נמחקו מכתשים, לא את קו המתאר של האגן. לאחר מכן החלק מציב את כל המרכזים על מפה אחת, לפני ההתעגלות ואחריה (C.3), ונותן את מקור הכיוון הדרומי (C.4).

נקודה אחת צריכה להיות ברורה לפני שקוראים את המפה. הברנר פעל כשהגוף עוד היה מחובר ומוארך, בשלב הפחיסות; הירח נעשה כדור רק מאוחר יותר, בהתעגלות פנימה שסוגרת את הרצף התעגלות החוצה → פחיסות → התעגלות פנימה (מאמר 7). על גוף מוארך, הקו מנקודה דרך המרכז עובר בכיוון שונה מן הקו העובר דרך אותה פיסת פני שטח לאחר שהגוף התעגל. אותן פיסות פני שטח נשארות זו מול זו — שינוי צורה שהוא אחיד בכל הגוף שומר נקודות מנוגדות מנוגדות — אבל קווי הרוחב והאורך שבהם הן נקראות, והזוויות ביניהן, אינם אלה של היום. ההתעגלות משנה אפוא את התמונה בלי שדבר זז על פני השטח. זה נושא C.3.

C.1 המרכזים

הנקודה שמול Imbrium (37° דרום, 161.5° מזרח) והנקודה שמול Serenitatis (25.4° דרום, 198.8° מזרח) נמצאות שתיהן בחלקו הצפוני של SPA, במרחק 1,022 ק"מ זו מזו; נקודת האמצע ביניהן נמצאת כ-650 ק"מ ממרכז האגן (גרסה קודמת נתנה כ-700 ק"מ). שתי הנקודות נופלות אפוא בתוך האגן, אך אף אחת מהן אינה נופלת על מרכזו: SPA נמצא מול שני הפתחים של הצד הקרוב, בחלקו הצפוני, ונמשך הרחק דרומה מהם. C.3 ו-C.4 מסבירים את ההתמשכות הזאת דרומה.

C.2 הטבעות והימות

הגרסה הפשוטה ביותר של הרעיון היא העתק קשיח: לוקחים את צורתו של כל אגן בצד הקרוב ומטביעים אותה, בלי שינוי, סביב הנקודה האנטיפודית שלו, כמו חותמת שנלחצת על הצד השני של דף. העתקת הטבעות של Imbrium (1,321 ק"מ) ושל Serenitatis (923 ק"מ) אל הנקודות האנטיפודיות שלהן נותנת מעטפת של 1340×2144 ק"מ (יחס צירים 1.60); העתקת 19 מצולעי הימות של שני האגנים נותנת 1185×2034 ק"מ (1.72). ממדי SPA הם 2402×2056 ק"מ (1.17), והכיוונים אינם מתאימים. יחס הצירים הוא הציר הארוך חלקי הקצר: 1 הוא עיגול, וככל שהמספר גדול יותר, קו המתאר מוארך יותר. שני ההעתקים מוארכים וקטנים מ-SPA, בעוד SPA כמעט עגול.

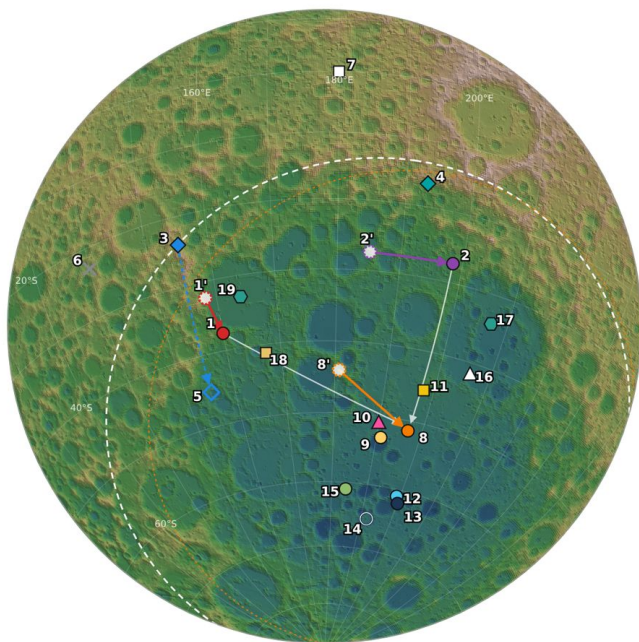
העתק אנטיפודי קשיח של אגני הצד הקרוב אינו משחזר את צורת SPA. התוצאה נשמרת. הטענה של מאמר זה שונה: הברנר קובע היכן נמחקו מכתשים, לא את קו המתאר של האגן.

לתוצאה השלילית יש ערך. היא מראה ש-SPA אינו הקרנה של אגני הצד הקרוב דרך הגוף. הברנר הוא מקור חום מתחת לצד הרחוק; הוא קובע היכן פני השטח התחממו והמכתשים שעליהם נמחקו, ואילו קו המתאר של האגן נקבע בידי הכיפה שהתרוממה מעל החום ובידי קריסתה המאוחרת יותר (חלק B).

C.3 כל המרכזים על מפה אחת

כל אחת מן המדידות של חלק B נותנת מרכז: של הכיפה, של רישום המכתשים, של הקרום הדק, של המסה הצפופה, של התוריום, של המגנטיות. כשמסתכלים עליהם אחד-אחד, המרכזים האלה מפוזרים; כשמציבים אותם יחד, מתגלה סדר. איור C.1 מציב אותם על מפה אחת יחד עם הנקודות שמול הצד הקרוב, ועם מיקומי שתי היציאות ומרכז הכיפה בשלב הפחוס, לפני ההתעגלות.

איך לקרוא את איור C.1. המפה מראה את הצד הרחוק כפי שהוא נראה מעל האגן, והגובה מסומן בצבע (כחול נמוך, חום גבוה). כל סמן נושא מספר, והטבלה שליד המפה נותנת את הקואורדינטות שלו ואת מרחקו הזוויתי ממרכז הכיפה; מעלה אחת על הירח היא כ-30 ק"מ. הסמנים מתחלקים לחמש קבוצות. **נקודות שמול הצד הקרוב:** היציאות של שני הברנרים, Imbrium (1, אדום) ו-Serenitatis (2, סגול); הנקודה שמול מרכז אזור המגע, שבה הציר ממרכז כדור הארץ יוצא מן הצד הרחוק (3, מעוין כחול); הנקודה שבה הדחיפה האופקית יוצאת מן הצד הרחוק, 22.5° דרומה ממנה (5, מעוין כחול חלול); הנקודה שמול מרכז אזור הגבעות (4); נקודת החיבור הקודמת (6, צלב אפור); והנקודה שמול כדור הארץ כיום (7, ריבוע לבן). **השלב הפחוס,** מסומן בקו מנוקד: היציאות (1', 2') ומרכז הכיפה (8') כפי שהיו על הגוף המוארך. **המרכז:** מרכז הכיפה, שהוא מרכז הטבעת הפנימית (8); מרכז האליפסה של האגן (9); השיא המגנטי הקרוב ביותר למינימום המכתשים (10); ומינימום המכתשים (11). **הדרום:** הקרקע הנמוכה ביותר שבין המכתשים (12), המסה הצפופה (13) והשיא של מודל המסה המקורי (14), והקרום הדק ביותר (15). **אחר:** אתר הנחיתה של Chang'e-6 (16), הכיפות הקטנות של קרום דק מעל שתי היציאות, Apollo (17) ו-Ingenii (19), ומרכז סהר התוריום (18).



Points opposite the near side

1	Exit of Imbrium, the main burner	37.6°S 160.0°E	29.2°
2	Exit of Serenitatis, the secondary burner	27.3°S 198.4°E	24.1°
3	The axis from the Earth's centre: opposite the contact centre (24.1°N 335.2°E)	24.1°S 155.2°E	41.8°
5	Exit by the horizontal push, 22.5° south of 3 (blue arrow)	≈45°S 155.2°E	≈28°
4	Opposite the centre of the hill zone (16.6°N 13.1°E)	16.6°S 193.1°E	34.9°
6	Former attachment point (not used)	23°S 140°E	51.7°
7	Point opposite the Earth today (for comparison)	0° 180°E	≈53°

At the flattened stage, before the rounding (1 : 0.637 : 0.601, long axis toward 3)

1'	Imbrium exit at the flattened stage → 1 today	32.3°S 158.1°E	21.2° from 8'
2'	Serenitatis exit at the flattened stage → 2 today	27.4°S 185.1°E	17.0° from 8'
8'	Dome centre at the flattened stage → 8 today	44.0°S 180.8°E	—

The centre

8	Centre of the dome: inner ring (B5; dotted orange)	51.4°S 196.8°E	—
9	Centre of SPA, the ellipse (Garrick-Bethell & Zuber 2009)	53°S 191°E	3.9°
10	Magnetic peak nearest the minimum (E.4)	51.0°S 190.0°E	4.3°
11	Crater minimum, 34 maria (B1)	45.4°S 197.9°E	6.0°

The south

12	Lowest intercrater ground (B2)	61°S 199°E	9.7°
13	Dense mass, James et al. 2019 (B10)	62°S 200°E	10.7°
14	Mass peak, original James model (B10)	65.2°S 191.9°E	14.0°
15	Thinnest crust after crater removal (B3)	61°S 184°E	11.9°

Other

16	Chang'e-6 landing site	41.6°S 206°E	11.6°
17	Small dome over the Serenitatis exit: Apollo, crust 5-9 km	34°S 207°E	18.9°
18	Thorium centroid, the crescent (B9)	41.2°S 167.2°E	22.6°
19	Small dome over the Imbrium exit: Ingenii, crust 12-16 km	33°S 164°E	30.1°

איור 1.C. המרכזים של SPA ושל סביבתו, על גבי מפת הגבהים של LOLA (מבט אורתוגרפי שמרכזו ב-38° דרום, 178° מזרח; רשת קווים כל 10°). קו מקווקו לבן: שפת SPA; קו מנוקד כתום: הטבעת הפנימית (B5). העמודה האחרונה נותנת את המרחק הזוויתי ממרכז הכיפה (° ≈ 1° 30 ק"מ). חצים צבעוניים: מן השלב הפחוס (1', 2', 8') אל היום (1, 2, 8). חצים לבנים: משתי היציאות אל מרכז הכיפה. חץ כחול: מן הציר העובר דרך מרכז כדור הארץ (3) 22.5° דרומה (5).

שלוש קבוצות. המפה מסדרת את המרכזים בשלוש קבוצות לאורך קו אחד מצפון לדרום. בצפון נמצאות היציאות של שני הברנרים (1, 2), ומעל כל אחת כיפה קטנה של קרום דק: Ingenii מעל Imbrium (19), במרחק 5.7° ו-Apollo מעל Serenitatis (17). באמצע נמצאים מרכז הכיפה, מרכז האגן, השיא המגנטי הקרוב ביותר למינימום ומינימום המכתשים (8-11), כולם בטווח של 6° ממרכז הכיפה (בטווח של 9° זה מזה; גרסה קודמת נתנה "בטווח של 6° זה מזה"). בדרום נמצאים הקרקע הנמוכה ביותר שבין המכתשים, המסה הצפופה והקרום הדק ביותר (12-15), בטווח של כ-230 ק"מ זה מזה. התוריום (18) עומד בנפרד מן הקבוצה האמצעית: הוא נמצא על יציאת Imbrium (6.6° ממנה), בצד הנגרר. בקריאת המודל, הקו עובר מן המקום שבו החום יצא (היציאות, צפון), דרך המקום שבו פעל הכי הרבה זמן על פני השטח (הכיפה ומינימום המכתשים, אמצע), אל המקום שבו הברזל מרוכז והכיפה קרסה הכי עמוק (המסה הצפופה והקרקע הנמוכה ביותר, דרום).

הציר ממרכז כדור הארץ. הקו ממרכז כדור הארץ דרך מרכז אזור המגע (°24.1 צפון, °335.2 מזרח) יוצא מן הצד הרחוק ב-°24.1 דרום, °155.2 מזרח (3), במרחק 41.8° ממרכז הכיפה. אילו החום היה עובר לאורך הקו הזה, הכיפה הייתה נמצאת בנקודה 3; היא אינה נמצאת שם. בתוך האגס המסתובב הדחיפה ניצבת לציר הסיבוב, לא לאורך הקו אל מרכז כדור הארץ; היא נכנסת אל דיסקת המגע צפונית למרכזה, במקום שבו נמצאים שני הברנרים, ויוצאת מן הצד הרחוק עד 22.5° דרומה מן הנקודה שמול (5, ≈47° דרום; גרסה קודמת נתנה ≈45° דרום): בקו הרחוב של הכיפה ושל המינימום. הנקודה שמול כדור הארץ כיום (7) ונקודת החיבור הקודמת (6) מוצגות להשוואה בלבד; נקודה 6 היא הנקודה האנטיפודית של נקודת הייחוס הישנה 23° צפון 320° מזרח, שהסדרה אינה משתמשת בה עוד — נקודות הייחוס כעת הן מרכז אזור המגע ברוב 3,000 ק"מ ושתי היציאות.

לפני ההתעגלות ואחריה. היציאות והכיפה נפרשו על הגוף המוארך (1 : 0.637 : 0.601), שהציר הארוך שלו הצביע אל כדור הארץ. שלושת המספרים הם אורכי שלושת צירי הגוף ביחס לאורך שבהם: הגוף היה ארוך בערך פי אחד וחצי בכיוון כדור הארץ מאשר ברובו. כשהגוף נעשה כדור, כל נקודה הגיעה להיות רחוקה יותר מקצה

הציר הזה (3), וככל שנקודה הייתה רחוקה ממנו יותר, כך גדל מרחקה יותר. הסיבה גיאומטרית. על גוף מוארך, פני השטח ליד קצה הציר הארוך דחוסים אל הציר; במבט מן המרכז, נקודות שם נמצאות בזוויות קטנות ממנו. כשהגוף מתעגל, הממדים הצדדיים גדלים ביחס לאורך, והזוויות במבט מן המרכז נפתחות. תמונה: נקודות שצוירו ליד הקצה של גוש בצק בצורת ביצה מתרחקות זו מזו, במבט ממרכזו, כשהבצק נלחץ לכדור, אף שאף נקודה אינה מחליקה על הבצק. דבר לא זז על פני השטח; שינוי הצורה שינה את המרחקים. אותו שינוי לוקח את מרחקו של SPA מן הקצה הרחוק של הגוף (3) מכ-27° בזמן הברנר, על הצורה הפחוסה, לכ-39.5° על הכדור של היום (A.5, B5): שוב שינוי מן הצורה הפחוסה לכדור, לא תנועה על פני השטח. המיפוי המלא נותן:

נקודה	השלב הפחוס	היום	שינוי	אל הכיפה
יציאת Imbrium (דרום, 158.1° מזרח 32.3° דרום, 160.0° מזרח 37.6°)	1	1' →	5.5°	21.2° → 29.2°
יציאת Serenitatis (דרום, 185.1° מזרח 27.4° דרום, 198.4° מזרח 27.3°)	2	2' →	11.8°	17.0° → 24.1°
מרכז הכיפה (8' → 8)	8	8' →	13.0°	—
מינימום המכתשים (דרום, 182.5° מזרח 39.9° דרום, 197.9° מזרח 45.4°)	—	—	12.6°	—

המיפוי המלא של ההתעגלות: הכיוון של כל נקודה כיום נלקח כקואורדינטה החומרית שלה, ומיקומה על הגוף המוארך הוא $(x, 0.637y, 0.601z)$ במערכת צירים שהציר הארוך שלה מצביע אל מרכז המגע והציר הקצר שלה הוא הקרוב ביותר לקוטב של היום.

המיפוי שבהערה מתחת לטבלה פועל כך. כל נקודה על פני השטח מסומנת לפי הכיוון שבו היא נמצאת כיום, (x, y, z) , כאשר x לאורך הציר הארוך לכיוון מרכז המגע. על הגוף המוארך אותה פיסת פני שטח הייתה ב- $(x, 0.637y, 0.601z)$: אותו מיקום לאורך הציר הארוך, אך קרובה אליו יותר מן הצד. הטבלה משווה בין שני הכיוונים. ככל שהצבע בעמודת השינוי כהה יותר, כך גדול יותר השינוי בקואורדינטות: יציאת Imbrium, הקרובה ביותר לקצה הציר הארוך (3), השתנתה הכי מעט (5.5°); הכיפה ומינימום המכתשים, הרחוקים ממנו יותר, השתנו הכי הרבה (13.0° ו-12.6°). העמודה האחרונה מראה את התוצאה החשובה למאמר: המרחק מכל יציאה אל הכיפה גדל בכשבע עד שמונה מעלות.

בשלב הפחוס מרכז הכיפה היה 17° דרומית ליציאת Serenitatis ו-21° דרום-מזרחית ליציאת Imbrium; ההתעגלות הביאה את המרחקים האלה ל-24° ול-29° הנמדדים כיום. ההתעגלות מגדילה את ההפרדה אך אינה קובעת את כיוונה: הכיפה הייתה דרומית לשתי היציאות כבר בשלב הפחוס. מקור הכיוון הדרומי מוצג ב-C.4.

C.4 מקור הכיוון הדרומי

השאלה של סעיף זה היא מדוע הכיפה נמצאת דרומית לשתי היציאות, ולא סביבן. שני גורמים פועלים יחד: הראשון קובע את הכיוון, השני מגדיל את המרחק.

מיקום האגס וכוחות הסיבוב. קצה האגס, ועליו הירח, עמד בכ-22.5° צפון; בסיס האגס עמד בערך על המשווה של אותו זמן. בתוך האגס המסתובב הדחיפה ניצבת לציר הסיבוב של כדור הארץ — אופקית — ולא לאורך הקו אל מרכז כדור הארץ. זו תכונה של כל גוף מסתובב: הדחיפה החוצה של הסיבוב מכוונת ישר הרחק מציר הסיבוב, כמו רוכב על קרוסלה שנדחף הרחק מן העמוד המרכזי לאורך האופק, בכל גובה שבו הוא יושב. עבור נקודה בקו הרוחב של קצה האגס, הקו אל מרכז כדור הארץ נוטה כלפי מעלה לכיוון צפון בזווית השווה לקו הרוחב, בעוד שהדחיפה מאוזנת; ההפרש ביניהם הוא בערך קו הרוחב, כ-22.5°. החום שעבר בתוך האגס הגיע אפוא אל דיסקת המגע צפונית למרכזה, במקום שבו נמצאים שני הברנרים, ויצא מן הצד הרחוק דרומית לנקודה שמול מרכז המגע, בעד קו הרוחב של הירח, ~22.5° (איור C.1, נקודות 3 ו-5). זה הכיוון שנמדד: בשלב הפחוס

מרכז הכיפה היה 17° דרומית ליציאת Serenitatis ו- 21° דרום-מזרחית ליציאת Imbrium (C.3), והכיפה, מינימום המכתשים והמרכז החם נמצאים כולם דרומית ליציאות.

הפחיסות. היציאות והכיפה נפרשו על הגוף המוארך, שציריו ביחס $1 : 0.637 : 0.601$. כשהוא נעשה כדור, המרחקים מקצה הציר הארוך שלו גדלו: מיציאת Serenitatis אל הכיפה $17^\circ \rightarrow 24^\circ$, מיציאת Imbrium $21^\circ \rightarrow 29^\circ$ (C.3). הפחיסות אינה קובעת את הכיוון; היא מגדילה את ההפרדה שהסיבוב קבע. בקיצור: הסיבוב קבע שהכיפה נמצאת בדרום; המעבר מן הצורה הפחוסה לכדור קבע כמה רחוק.

גורם שלישי אפשרי — שבירה של מסלול החום בליבה הצפופה, הפועלת כמנסרה — נותן לכל היותר מעלות ספורות, ללא כיוון מועדף, ואינו בשימוש.

ציר כדור הארץ לאחר הניתוק. בהחלט ייתכן שציר כדור הארץ השתנה לאחר הניתוק. שינוי בכיוון ציר הסיבוב של כדור הארץ משנה את מערכת הצירים שבה כיוון הברנר נקרא כיום — ואיתה את מישור מסלול הירח ואת ציריו שלו — כך ש-SPA נראה לא בקו אחד עם הברנר, אף שהחום אכן עבר לאורכו. כל המיקומים במאמר זה ניתנים במערכת הצירים של היום. מאמר זה בכוונה אינו נכנס לחקר הצירים; הוא נשאר לעבודה עתידית.

תוצאה

הכיוון הדרומי של הכיפה ביחס לשתי היציאות נקבע בידי מיקום האגס וכוחות הסיבוב, והפחיסות הגדילה אותו להפרדה הנמדדת כיום. שינוי של ציר כדור הארץ לאחר הניתוק עשוי להוסיף להבדל הנראה בין SPA לבין הברנר; הצירים נשארים בכוונה לעבודה עתידית.

מה יש בידינו כעת: המרכזים של SPA נמצאים על קו אחד מצפון לדרום, מול שתי היציאות ודרומית להן; הכיוון דרומה בא מן הדחיפה האופקית בתוך האגס המסתובב, וגודל ההפרדה כיום, 24° – 29° , בא מן ההתעגלות של הגוף המוארך, שהביאה אותה מ- 17° – 21° .

חלק D — הגרסה הדינמית: עמוד, סיבוב וזווית

חלק C מיקם את הברנר מבחינה גיאומטרית. חלק D שואל אם הוא יכול לפעול מבחינה פיזיקלית. הברנר זקוק לכך שחומר וחום יעברו מפנים כדור הארץ אל האזור שמול הפתחים. חלק זה שואל אם המספרים מאפשרים זאת: מהירות המעבר זמנו (D.1), האנרגיה והלחץ (D.2), המחסום של רדיוס הקורטציה וההקלה שגוף רציף נותן (D.3, D.3a), הכיוון שבו הסיבוב מסיט זרימה (D.4), והמרחק שסיבוב וזווית יציאה קטנה יוצרים (D.5). במילים פשוטות התמונה היא זו: חומר עולה מכדור הארץ דרך האגס, כעמוד, בזמן שכל המערכת מסתובבת; עליו לטפס החוצה מכבידת כדור הארץ עד שהסיבוב משתלט; וזווית קטנה שבה הוא יוצא, הנשמרת לאורך מסלול ארוך, מספיקה כדי למקם את החום מאות קילומטרים מן הנקודה שמול בדיוק.

D.1 מהירות זמן מעבר

בשימור פשוט של תנע זוויתי, חומר העולה מפנים כדור הארץ מגיע למהירויות רדיאליות של 1.8–2.6 ק"מ/ש', עם זמני מעבר של 1.2–1.5 שעות. תנע זוויתי הוא כמות הסיבוב שגוף נושא — מסתו כפול מהירותו סביב הציר כפול מרחקו ממנו; כשדבר מבחוץ אינו מסובב את הגוף, הוא נשאר קבוע, כך שחומר הנע החוצה מאט את סיבובו, כמו מחליקה שפורשת את ידיה ומסתובבת לאט יותר. מעבר של 1.2–1.5 שעות הוא כרבע מן היממה של כדור הארץ באותו זמן או פחות: החומר עובר בחלק מסיבוב אחד. ההפרש של 57° בין כיווני הצירים אינו השהיה נצפית של החומר במעבר ואינו משמש ככזה.

D.2 אנרגיה ולחץ

האנרגיה הקינטית במהירויות האלה היא 1.6–3.4 מגה-ג'ול/ק"ג; המרה אידיאלית ללחץ בצפיפות 3,000 ק"ג/מ"ק נותנת 5–10 ג'יה-פסקל. האנרגיה הקינטית לקילוגרם היא חצי ריבוע המהירות; הלחץ הוא האנרגיה הזאת כפול הצפיפות, המרב שזרימה יכולה למסור אם כל תנועתה נעצרת. 5–10 ג'יה-פסקל הם הרבה יותר ממה שהקרום יכול לעמוד בו, אבל זה אינו כולל את מחסום הפוטנציאל, ש-D.3 מחשב.

D.3 מחסום הפוטנציאל

כדור הארץ הקדום הסתובב פעם אחת בכחמש וחצי עד שש שעות (5.5 שעות לפני הבליטה, 5.77 שעות בשחרור). על חומר בפני השטח שלו פועלות שתי השפעות: הכבידה מושכת אותו פנימה והסיבוב דוחף אותו החוצה. ליד פני השטח הכבידה חזקה הרבה יותר; רחוק יותר היא נחלשת בעוד הדחיפה החוצה גדלה, וברדיוס הקורטציה — כ-15,800 ק"מ ממרכז כדור הארץ (מאמר 2) — שתיהן מתאזנות. רדיוס הקורטציה הוא המרחק שבו גוף שמסתובב עם כדור הארץ כבר נע במהירות של מסלול חופשי, כך שאינו זקוק לתמיכה. כדי להביא חומר מפני השטח לנקודה הזאת יש לשאת אותו במעלה גבעה; מעבר לה הסיבוב נושא אותו החוצה מעצמו, כמו כדור בצדה השני של פסגת גבעה שמתגלגל למטה בלי שדוחפים אותו. גובה הגבעה הוא מחסום הפוטנציאל, האנרגיה לקילוגרם הדרושה כדי להרים חומר מפני השטח אל רדיוס הקורטציה:

$$\Phi_{\text{eff}}(r) = -\frac{GM_0}{r} - \frac{1}{2}\Omega^2 r^2, \quad \Delta\Phi = \Phi_{\text{eff}}(R_c) - \Phi_{\text{eff}}(r_0),$$

עם מסת האב של הסדרה, $M_0 = 6.0455 \times 10^{24}$ ק"ג. במילים: Φ_{eff} הוא הפוטנציאל האפקטיבי, האנרגיה לקילוגרם של חומר במרחק r במערכת הצירים שמסתובבת עם כדור הארץ. האיבר הראשון הוא הכבידה (G קבוע הכבידה), העמוק ביותר ליד כדור הארץ; השני הוא הסיבוב (Ω מהירות הסיבוב הזוויתית של כדור הארץ), שמוריד את האנרגיה ככל שהחומר רחוק יותר. סכומם עולה מפני השטח עד מרב ברדיוס הקורטציה R_c ויורד מעבר לו; $\Delta\Phi$ הוא ההפרש בין פסגת הגבעה הזאת לבין נקודת ההתחלה r_0 . רדיוס ההתחלה הוא הרדיוס

המקומי של כדור הארץ המסתובב במהירות והפחוס, בקו הרוחב של המקור, 25° צפון (מאמר 11 C.2§): עם הרדיוס המשווני של הסדרה, $6,721$ ק"מ, והרדיוס הנפחי, $6,517$ ק"מ, $r_0 \approx 6,602$ ק"מ. (25° צפון הוא קו הרוחב של המקור; בסיס האגס על כדור הארץ נמצא ליד Kiritimati, קרוב לקו המשווה, מאמר 3 ומאמר 9.) עבור אורך היממה של כדור הארץ בזמן השחרור, 5.77 שעות (מאמר 2, B.1§), ועבור 5.5 שעות להשוואה:

רדיוס התחלה	5.50 שעות	5.77 שעות
קו הרוחב של המקור, 25° צפון: 6,602 ק"מ (הערך שאומץ)	25.2	26.2
נפחי: 6,517 ק"מ	25.9	26.9
משווני: 6,721 ק"מ	24.2	25.2

המחסום במגה-ג'ול/ק"ג; רדיוס הקורטוציה $15,883$ ק"מ ב- 5.5 שעות ו- $16,399$ ק"מ ב- 5.77 שעות.

הטבלה נותנת את גובה הגבעה עבור שלוש בחירות של רדיוס התחלה ושני אורכי יממה. רדיוס התחלה גדול יותר מתחיל גבוה יותר על הגבעה ומשאיר פחות לטפס; יממה ארוכה יותר מרחיקה את רדיוס הקורטוציה ומגביהה את הגבעה. הערך שאומץ הוא 26.2 מגה-ג'ול/ק"ג. רדיוס הקורטוציה ב- 5.5 שעות מופיע בטקסט כ- $15,800$ ק"מ ומתחת לטבלה כ- $15,883$ ק"מ: שניהם נכונים, להגדרות שונות — $15,818$ ק"מ לחלקיק בוחן סביב כדור הארץ לבדו (מאמר 2), ו- $15,883$ ק"מ בשדה הכבידה המלא של המערכת (מאמר 3 A.9§). ב- 5.77 שעות הוא $16,399$ ק"מ, כ- 2.6 רדיוסי כדור הארץ.

עבור חבילת חומר אחת העולה לבדה, מהירויות של 1.8 – 2.6 ק"מ/ש' (1.6 – 3.4 מגה-ג'ול/ק"ג) נופלות מגובה הגבעה בפקטור של שבעה עד שש-עשרה; בחירת רדיוס ההתחלה משנה את המחסום ב- 1 – 2 מגה-ג'ול/ק"ג בלבד. חבילה שנזרקת למעלה לבדה הייתה אפוא נופלת חזרה הרבה לפני רדיוס הקורטוציה. D.3a מראה מדוע זה אינו המצב במודל.

D.3a המחסום עבור גוף רציף

המחסום שלעיל חל על חבילת חומר העולה לבדה. במודל החומר אינו חוט דק אלא גוף שלם: החיבור רחב (מאמר 3), הגוף מלא חומר, והגוף הוא חלק מכדור הארץ, דחוס בכל נפחו בידי הכבידה של כדור הארץ ובידי הלחץ מלמטה — הלחץ בתוכו חיובי בכל מקום. בגוף כזה, המשיכה החוצה על החלק שמעבר לרדיוס הקורטוציה אינה קורעת דבר; היא מורידה את הלחץ שמתחתיו. הלחץ בבסיס יורד, וחומר מפנים כדור הארץ נדחף למעלה אל אזור הלחץ הנמוך, כמו בסיפון, בלי שהלחץ יעשה שלילי אי-פעם. סיפון פועל באותה דרך: נוזל שעבר מעל הפסגה ונופל בצד השני מוריד את הלחץ מאחוריו, והנוזל שבכלי נדחף במעלה הצינור בידי לחץ האוויר על פניו; דבר אינו מושך את הנוזל כמו חבל. חלק מן האנרגיה להרמת חומר חדש בא אפוא מכך שהחומר שכבר נמצא מעבר לרדיוס הקורטוציה נמשך החוצה, והמחסום האפקטיבי נמוך יותר מאשר עבור חבילה בודדת. המקור האחרון של האנרגיה הוא סיבוב כדור הארץ, כמו בשאר הסדרה. זה אינו מחליף את ההרמה של מאמר 3: המנוע נשאר הלחץ מלמטה, העלייה המגמטית שלחץ המקור שלה, כ- 150 ג'יגה-פסקל, נושא את החומר למעלה (מאמר 3, A.9–A.10), והסיבוב לבדו אינו מרים דבר. ההקלה פועלת רק לאחר שחלק מן הגוף נמצא מעבר לרדיוס הקורטוציה — בשלבים המאוחרים, לא המוקדמים — והיא מורידה את הלחץ שהבסיס צריך לספק; היא אינה נושאת מתיחה (מאמר 3, C.5). דרישה: המחסום האפקטיבי ולחץ הבסיס המופחת, מחושבים עבור גוף בצורה ובגודל של מאמר 3.

אותה השפעה פועלת בצד הרחוק. הצד הרחוק של הגוף נמצא מעבר לרדיוס הקורטוציה, שם הסיבוב מושך החוצה, הרחק מכדור הארץ, ומקל על יציאת חומר מן הפתחים של חזית הכיפה (מאמר 5). הלחץ מלמטה זרק מסות גדולות, שחזרו כמכתשים גדולים. המכתשים הקטנים והטריים השוכבים על הגדולים בתוך SPA (B1h)

באים בעיקר ממקור מאוחר יותר: אחרי הניתוק נחשפו הפתחים של האגס, כדור הארץ שחרר דרכם את הלחץ שלו וזרק חומר לכל הכיוונים, והחלקים הקטנים והבינוניים שהגיעו אל הירח התפזרו באופן אחיד על כל פני השטח שלו; ייתכן שגם פתחים נוספים של הירח עצמו פיזרו חומר עליו. חומר שיוצא מפתחי הצד הרחוק אינו בורח לחלל: לגוף יש כבידה משלו, עם מהירות מילוט של כ-2.3 ק"מ/ש' ברדיוס שלו אז, 1,890 ק"מ (2.4 ק"מ/ש' ברדיוס של היום, הערך שנתנה גרסה קודמת), מעט פחות בצד הרחוק, שם הסיבוב מסייע. מהירות המילוט היא המהירות שבה רסיס עוזב גוף לתמיד; מתחתיה הרסיס חוזר. חומר היוצא מן הפתחים לאט יותר עולה, מאט ונופל חזרה אל הגוף, והחומר החוזר יוצר מכתשים (מאמר 6). מנגנון אחד מושך אפוא חומר פנימה בבסיס ומקל על יציאתו בצד הרחוק. דרישה: מהירויות יציאה מפתחי הצד הרחוק נמוכות ממהירות המילוט המקומית. הירח כולו אינו נופל חזרה אל כדור הארץ, כי הוא נמצא מעבר לרדיוס הקורוטציה ונזרק אל מסלול (מאמר 4); חומר שעוזב אותו חוזר אליו רק כל עוד הוא נשאר בתוך תחום השליטה הכבידתית של הירח עצמו — האזור סביב גוף קטן, הקרוב לגוף גדול, שבתוכו משיכת הגוף הקטן שולטת בתנועת רסיס יותר ממשיכת הגוף הגדול (ספירת Hill). ליד קו הקורוטציה (16,400 ק"מ), שהירח השתחרר כ-210 ק"מ מעבר לו, הספירה הזאת מגיעה לכ-2,600 ק"מ ממרכז הירח — 1.4 רדיוסים של הירח של אז (1,890 ק"מ) — כך שרק חומר העולה פחות מכ-700 ק"מ מעל פני השטח חוזר ליצור מכתשים (גרסה קודמת, ברדיוס של היום, נתנה 1.5 רדיוסים ו-900 ק"מ); חומר שנזרק גבוה יותר בורח מן הירח, אל מסלול או ליפול אל כדור הארץ.

D.4 מבחן הסימן

במערכת הצירים של הסיבוב, כוח Coriolis מסובב זרימה החוצה נגד כיוון הסיבוב, מערבה. כוח Coriolis הוא הדחיפה הצדדית הנראית שמרגיש כל דבר הנע במערכת מסתובבת: חומר הנע החוצה נושא עמו את הסיבוב האיטי יותר של המקום שממנו בא, ולכן הוא מפגר אחרי הקרקע שמתחתיו, וזו ההסטה נגד כיוון הסיבוב. המבחן שואל אם הסטה אחת זו יכולה למקם את שתי היציאות ביחס לאגן. הנקודה האנטיפודית של Serenitatis (198.8° מזרח) נמצאת 7.8° ממרכז SPA (191° מזרח) בכיוון שההסטה הזאת דורשת; הנקודה האנטיפודית של Imbrium (161.5° מזרח) נמצאת בצד השני. הסטה פשוטה אחת אינה משרתת את שתיהן. הסטת Coriolis אינה אפוא מקור הגיאומטריה; המקור הוא הדחיפה האופקית של C.4.

D.5 זווית יציאה קטנה

זווית קטנה הנשמרת לאורך מסלול ארוך יוצרת מרחק גדול, כמו רובה שמכוון שבר מעלה הצידה ומחטיא מטרה רחוקה בפער רחב. מבחינה גיאומטרית $s = L \tan \alpha$, כאשר L אורך המסלול, α הזווית ביציאה, ו- s המרחק בין הנקודה שישר קדימה לבין הנקודה שאליה מגיעים: לאורך מסלול של 9,447–11,199 ק"מ, זווית של 1°–3° נותנת מרחקים של 165–590 ק"מ בין היציאה לבין הנקודה שאליה מגיעים. נדרש מקור פיזיקלי לזווית; הגיאומטריה לבדה אינה ראייה לקיומו. C.4 נותן אותו: הדחיפה האופקית בתוך האגס המסתובב. (מבחן נוסף, על הכבידה העצמית של הגוף הגדל, לא ניתן היה לשחזר אותו ואינו בשימוש.)

מה יש בידינו כעת: חבילת חומר לבדה אינה יכולה לטפס על המחסום, אבל גוף רציף, הנדחף מלמטה בלחץ המקור של מאמר 3 ומוקל בבסיסו לאחר שחלק ממנו נמצא מעבר לרדיוס הקורוטציה, יכול; בצד הרחוק הסיבוב מקל על יציאת החומר, שחוזר בתוך ספירת Hill של הירח; המכתשים הקטנים והטריים שעל הגדולים באים בעיקר מחומר שכדור הארץ זרק אחרי הניתוק, שהתפזר באופן אחיד על הירח; ומרחק החום מן הנקודה שמול נקבע בידי הדחיפה האופקית, לא בידי הסטת Coriolis.

חלק E — אתגרים ותשובות

כמה ממצאים שפורסמו נראים כעומדים נגד ההצעה. חלק זה מציג אותם אחד-אחד, כל אחד עם תשובת המודל. כל סעיף מציג תחילה את הממצא בהגינות, כפי שמחבריו קוראים אותו, ולאחר מכן נותן את קריאת המודל, ובמקום שיש כזו, את המדידה שתכריע בין השתיים. שאלות שנדרשים נתונים חדשים כדי להכריע בהן אינן נענות כאן; הן מפורטות כמבחנים בחלק F.

E.1 אירידיום וזהב במתכות של Chang'e-6

הממצא. Liu et al. (2026) מדווחים על Au ו-Ir בגרגרי מתכת מרסיסי פגיעה של Chang'e-6, וקוראים חלק מהם כחומר של כונדריט פחמני, כלומר כמתכת שהביא אסטרואיד קדום. **התשובה.** הגרגרים נמצאים ברסיסי רגולית בזלתיים ואנורטוזיטיים, שהמחברים סיווגו כרסיסי פגיעה, לא בנוריטים המתוארכים, והם אינם מתוארכים; גרגרים כאלה הם אבק חלל שנמשך מאוחר יותר בכבידת הירח אל שכבת פני השטח הרופפת, וזה מה שהתחזית מתירה. הרגולית היא השכבה הרופפת של אבק ורסיסים על פני השטח, האוספת חומר מבחוץ לאורך כל תולדות הירח. Au ו-Ir אינם מבחינים בין אסטרואיד לבין מתכת מפנים כדור הארץ, העשירה ביסודות סידרופיליים — היסודות ה"אוהבים ברזל", שהולכים אחר המתכת ולכן מרוכזים בכל מקום שיש בו מתכת. היחסים שפורסמו הם יחסי יסודות, לא איזוטופים. רק מערכות איזוטופיות (Cr, Ti, Mo, Ru, Os) יכולות להכריע: ביסודות האלה כדור הארץ וסוגי המטאוריטים נושאים טביעות אצבע איזוטופיות נבדלות, שאינן משתנות כשהמתכת מותכת או מופרדת.

E.2 מתכת של גוף זר בנוריטים (קריאת הפגיעה)

הממצא. Su et al. (2025) מדווחים על מתכת Fe-Ni בתוך שני רסיסי נוריט בני כ-4.25 מיליארד שנה, עם Ni/Co של 8.5–11, מעל הערכים שמתחת ל-5 של המתכת שכבר בירח, וקוראים אותה כתרומה של הגוף הפוגע. **התשובה.** Ni/Co לבדו אינו מזהה את המקור: לסיליקט הכולל של כדור הארץ יש 18.7, לכונדריטים מסוג 21.0 CI (McDonough & Sun 1995), וגרגר מתכת הוא פאזה שהתחלקה בין מתכת, סיליקט וסולפיד. שני המקורות המועמדים — כדור הארץ וגוף כונדריטי — נמצאים מעל הערכים של המתכת שכבר בירח, כך שיחס גבוה מבחין בין הגרגרים לבין המתכת הזאת, שהגיעה מזמן לשיווי משקל, אבל אינו אומר מאיזה מן השניים היא באה; והיחס בגרגר בודד תלוי באופן שבו ניקל וקובלט התחלקו בין הפאזות כשהוא נוצר. המודל קורא את המתכת כברזל שבא מלמטה, וחווה חתימה איזוטופית ארצית. הנוריטים האלה נמצאים בתוך הדגימה, חלק ממנה מאז שנוצרה: הם המקום שבו תחזית המודל נקראת באופן הישיר ביותר (חלק F, השורה הראשונה).

E.3 המסה הצפופה אינה מתחת למינימום

הממצא. James et al. נמצאת כ-500 ק"מ דרומית למינימום ונמשכת מאות קילומטרים לעומק. **התשובה.** היא אינה הברזל שמתחת למינימום; במודל היא ברזל שהתרכז בעומק מתחת לאגן, דרומית לכיפה (B10). המינימום מסמן היכן החום מחק את המכתשים על פני השטח; המסה הצפופה מסמנת היכן הברזל התרכז, בקבוצה הדרומית של איור C.1. המודל אינו דורש ששני אלה יחפפו.

E.4 השיאים המגנטיים אינם במינימום

הממצא. השיא החזק הקרוב ביותר שנמצא (51.0° דרום, 190.0° מזרח) נמצא כ-230 ק"מ מן המינימום, ובמינימום השדה חלש (1.9 ננו-טסלה בגובה 25 ק"מ, 0.85 B16; ננו-טסלה בנקודת הבדיקה 44.8° דרום, 198.4° מזרח, כ-20 ק"מ ממנו, הערך שגרסה קודמת נתנה למינימום עצמו). **התשובה.** זה מה שהברנר חווה:

חום מוחק מגנטיזציה בליבתו ומשאיר אותה בשוליים הקרים יותר. חומר ממוגנט מאבד את המגנטיזציה שלו כשהוא מחומם מעל טמפרטורה מסוימת, ושומר עליה במקום שבו הוא נשאר קר יותר; מקור חום משאיר אפוא מרכז חלש וטבעת ממוגנטת, וזה הדפוס שנמדד (B16).

E.5 הקרום במינימום אינו הדק ביותר

הממצא. המינימום (19–28 ק"מ) אינו דק יותר מן המרכז הנומינלי (15–24 ק"מ). **התשובה.** הטענה היא שהחסר נמצא בתוך אזור הקרום הדק, לא בנקודה הדקה ביותר שלו (B1, B3). החום בא מלמטה והתיך את האזור כולו, את חלקיו העבים והדקים כאחד; בתוך אזור הקרום הדק, המקום עם הכי מעט מכתשים נקבע לפי כיוון היציאות, לכיוון הנקודה האנטיפודית של Serenitatis, ואילו הקרום הדק ביותר נמצא בדרום המבני של האגן (איור C.1).

E.6 בזלות קבורות

הממצא. Wang et al. (2024) מפרשים לפחות 8.7×10^4 קמ"ר של בזלות קבורות, בעובי של יותר מקילומטר, במרכז SPA — מקור חלופי למכתשים רדודים, שכן לבה שמילאה מכתש עושה אותו רדוד יותר. **התשובה.** במודל, בזלות קבורות הן תוצר של הברנר, לא מתחרה בו: חום מלמטה יוצר התכה וגעשיות. המבחן הוא אם ההרדדה נמשכת מחוץ לבזלות הקבורות. אם כן, הלבה אינה יכולה להסביר אותה, וחימום הקרקע והידחסותה יכולים.

E.7 הכלל "פרט לרגולית"

הממצא. כמעט כל החומר של Chang'e-6 בא מן הרגולית, כך שקורא עשוי לשאול אם אפשר בכלל לבדוק את התחזית. **התשובה.** התחזית עוסקת במקור הדגימה — חומר זר שהיה חלק ממנה כשנוצרה, כמו מתכת בתוך נוריט בן 4.25 מיליארד שנה — ולא במקום שבו נאספה. רסיס שנאסף מן הרגולית יכול להיות עתיק כמו האגן, ומה שהכיל כשנוצר הוא תיעוד של אותו זמן. המודל צופה שהמתכת בנוריטים העתיקים ארצית; חומר זר, אם יימצא בכלל, צפוי בכמויות זעירות בלבד — גרגרים דקים של אבק חלל שנמשכו מאוחר יותר בכבידת הירח אל שכבת פני השטח, או מטאוריט בודד.

חלק F — תחזיות ומבחנים

חלק זה מפרט מה המודל חוזה ואת המבחנים שעדיין דורשים נתונים חדשים. כל שורה בטבלה מציגה מה המודל מצפה שיימצא. שתי שורות, צבועות בירוק, כבר נמדדו במאמר זה: הטבעות המעובות אוששו, וההידחסות בעומק נתמכת.

תחזית
המתכת בשני הנוריתים המתוארכים (CE6C0100YJFM002-158, CE6C0200YJFM001EGP07-16) ארצית ב-, Cr, Ti, Mo, Ru או Os; חומר זר בדגימות העתיקות של הירח, אם בכלל, בכמויות זעירות בלבד
אובדן חומרים נדיפים וחיזור חזקים ביותר ליד המינימום, וחלשים יותר לכיוון השפה
מכתשים רדודים נמשכים מחוץ לבולות הקבורות
מכתשים בעלי רצפה סדוקה מרוכזים בחסר
מגנטיזציה חזקה ביותר בשולי הליבה המחוממת, שמקורה בעומק
החסר עוקב אחר הנקודות האנטיפודיות של פתחי הצד הקרוב
ים רגיל באמצע SPA, שפלט חומר בזמן שהירח היה מחובר, ומאוחר יותר חומם עם האזור כולו ונמחק: הבולות הקבורות נמשכות הרבה מעבר לכתמי הים הנראים, ושדה הכבידה מראה את העומס של מילוי בזלתי קבור (A.5, B9)
מכתשים קטנים על גבי הגדולים, בעיקר מחומר שכדור הארץ זרק אחרי הניתוק ושהתפזר באופן אחיד על הירח: בתוך SPA היחס בין מכתשים קטנים לגדולים גבוה מאשר במקומות אחרים (4.62 לעומת 2.13 שנמצאו, B1h), והמכתשים הקטנים השוכבים על הגדולים טריים בעוד הגדולים בלויים. המבחן השני מוכן אך עוד לא נעשה: מדגם אקראי של 20 מכתשים מארחים של 40–80 ק"מ בתוך SPA ו-20 בביקורת באותם קווי רוחב, שהוקפא לפני הבדיקה (2,634 מכתשים קטנים מועמדים), עם קריטריוני סיווג קבועים וסולם טריות קבוע (עומק ביחס למכתשים טריים באותו גודל; Krüger et al. 2018); הוא ממתין לבדיקת התמונות מכתש אחר מכתש
שתי אוכלוסיות מכתשים בתוך SPA: מכתשים ישנים בלויים ופחוסים, מכתשים צעירים טריים (B1k)
מכתשים צעירים בתוך SPA בעלי שפה גבוהה יותר ממכתשים צעירים מחוצה לו, שנוצרו על מטרה דחוסה (B1k)
הקרומ שהחליק החוצה מן הכיפה נערם בטבעות סביב אזור הקרום הדק (B3) — אושש : עיבוי חיצוני של 3.8–5.7 ק"מ ב-50°–55 בכל ארבעת מודלי GRAIL, הבולט מעל הקרום שרחוק יותר בשבעה משמונה כיוונים, עבה במזרח וחסר במערב (B4); טבעת פנימית בשולי הכיפה (B5); כ-37% מן הנפח החסר בתוך 60°
הקרומ בתוך SPA דחוס בעומק, במקום שבו החום היה חזק ביותר — שכבותיו "בושלו" (B2). נתמך בעומק : על פני השטח SPA נקבובי כמו הצד הרחוק שסביבו; בעומק 10 ק"מ הנקבוביות היא 2.9–4.4% במרכז, ועולה בהתמדה ל-7.1–8.8% בשפה, לעומת 6.2–12.8% מסביב (B6, באקסטרפולציה)

טבלה: התחזיות (חלק F). השורות הירוקות כבר נמדדו במאמר זה.

מדוע כל תחזית נובעת מן המודל. השורה הראשונה היא החדה ביותר: המודל בונה את הירח מחומר של כדור הארץ, ולכן מתכת שהיא חלק מדגימה עתיקה מאז שנוצרה נושאת חתימה איזוטופית ארצית, ואילו קריאת הפגיעה דורשת חתימה זרה. השורה השנייה נובעת מן החום: מקור ארוך-חיים מגרש יסודות נדיפים ומסלק חמצן בעוצמה הרבה ביותר במקום החם ביותר, ולכן החתימה מסמנת מרכז חימום. השלישית מפרידה בין הברנר לבין הल्בה: מכתשים רדודים מחוץ ללבה הקבורה מוסברים בחימום ובדחיסה של הקרקע, לא במילוי לבה. הרביעית משתמשת במכתשים בעלי רצפה סדוקה, מכתשים שרצפתם הורמה ונסדקה בידי התכה שעלתה מתחתיהם;

חום מלמטה מרכז אותם בחסר. החמישית נובעת מ-E.4: חום שמחק את הליבה מלמטה משאיר את המגנטיזציה חזקה ביותר בשוליים, שמקורה בעומק. השישית היא הבסיס של המאמר: החסר עוקב אחר הנקודות האנטיפודיות של פתחי הצד הקרוב, וזה מה שנותן לברנר את מקומו. השביעית בודקת את הים המרכזי: בזלות קבורות הנמשכות מעבר לכתמים הנראים, עם חתימת כבידה של מילוי קבור, מסמנות ים רגיל באמצע SPA שחומם עם האזור ונמחק. השמינית עד העשירית בודקות את תולדות רישום המכתשים: מכתשים קטנים מחומר שכדור הארץ זרק אחרי הניתוק, שתי אוכלוסיות בגילים שונים, ושפות גבוהות במכתשים צעירים שנוצרו על קרקע דחוסה. שתי האחרונות כבר נמדדו: טבעות הקרום שהחליק החוצה, והנקבוביות הסגורות בעומק.

מבחנים הדורשים נתונים חדשים: המינימום המרחבי של העומק לאחר מסכת הימות — היכן המכתשים רדודים ביותר לאחר שהימות וההילות שלהם הוסרו; ספירה של מכתשים בעלי רצפה סדוקה (Jozwiak et al. 2012), לבדיקת השורה הרביעית; $OH\text{-}FeO$, Th שנדגמו במינימום ובטבעות, לבדיקת השורה השנייה לאורך אותו פרופיל רדיאלי כמו המכתשים; העומק והכיוון של המגנטיזציה, לבדיקת השורה החמישית; מבחן אפס לבחירת Serenitatis מבין כל הפתחים — האם חסר הממוקם באותה התאמה לכיוון נקודה אנטיפודית היה נוצר במקרה עבור פתח כלשהו; מבחן מחוץ למדגם, על נתונים שלא שימשו לבניית הקריאה.

חלק G — מסקנות ועבודה נוספת

מה המאמר הראה, ומה נותר לעשות. חלק B הציג את שבע-עשרה האנומליות של South Pole–Aitken, ובמקומות שבהם המאמר מדד אנומליה בעצמו — מחקר משלו (מחקרים 1–5); חלק C הציב את המרכזים של האגן על מפה אחת ונתן את המקור לכיוון הדרומי; חלק D שאל אם המספרים מאפשרים לחומר ולחום לעבור מפנים כדור הארץ אל הצד הרחוק; חלק E השיב לממצאים שפורסמו ושנראים כעומדים נגד ההצעה; וחלק F מנה את התחזיות ואת המבחנים שלהן. החלק הזה מרכז את התוצאה בשלושה שלבים: חמשת המחקרים ותוצאתם בטבלה אחת (G.1), המסקנות, כל אחת מנוסחת כמה שנמצא ומה משמעותו (G.2), והעבודה הנוספת שתחدد אותן או תרחיב אותן. בחלק הזה לא נמדד דבר חדש; כל מספר בו לקוח מן הסעיף המצוין לצדו.

G.1 המחקרים והאנומליות בטבלה אחת

ההכרעות לגבי שבע-עשרה האנומליות מרוכזות ב-B18: המדע מסביר שש מהן במלואן, תשע באופן חלקי, אחת בקושי ואחת כלל לא; המודל מתאים לשש-עשרה, ולאחת באופן חלקי (B14), המתכת שבנוריטים, שהאיזוטופים יכריעו בה). ההכרעות האלה שוקלות מדידות שפורסמו. חמשת המחקרים שונים: בכל אחד מהם המאמר ניסח את ההשערה שלו ואת מה שציפה למצוא לפני שמדד, ורק אחר כך ביצע את המדידה בעצמו. לחמשת המחקרים שהמאמר ערך בעצמו ניתן כאן צבע ברמזור: ירוק במקום שבו ההשערה עמדה במלואה, כתום במקום שבו חלק ממנה עמד וחלק לא, ואדום במקום שבו לא עמדה.

כיצד לקרוא את הרמזור. הצבע בעמודה הראשונה הוא ההכרעה של המחקר לגבי ההשערה שלו עצמו, כפי שנוסחה בשלב "תוצאה" שלו. זה אינו ציון למודל כולו, וזו אינה השוואה עם הקריאה של אחרים. לעמודה השלישית שני חלקים. המשפט הראשון, או המשפטים הראשונים, אומרים מה עמד — התוצאה הנמדדת שההשערה דרשה. במקום שבו בא אחריהם משפט נוסף, הוא מציין את הגבול של התוצאה: מה שהנתונים אינם יכולים להכריע, או סיבה אחרת שיכולה ליצור חלק מאותו אות. גבול כזה מצוין כדי שהקורא יידע עד היכן התוצאה מגיעה; הוא אינו חלק של ההשערה שלא עמד, ומחקר שיש לו גבול מוצהר נשאר ירוק כאשר כל רכיב בהשערה שלו עמד. כל חמשת המחקרים יצאו ירוקים.

רמזור	מחקר	מה עמד, ומה לא
	1. תיעוד המכתשים (B1)	חוסר המרוכז במרכז (0.51), חזק יותר על קרקע נקייה יותר; המינימום על קו האורך של הנקודה שמול Serenitatis; הגדלים הבינוניים חסרים יותר מכול; מכתשים רדודים עם שפות גבוהות. הספירות במרכז קטנות, וההבדל בצורה נשען על 31 מכתשים
	2. העומק מול הקרום הדק (B2)	שארית של 1.1–1.8 ק"מ במרכז, היורדת לעבר השפה. גם המסה הצפופה שמתחת יכולה למלא אותה

3. הטבעת החיצונית (B4)	טבעת הגבוהה מן הקרום שמחוצה לה בשבעה משמונה כיוונים, עבה במזרח, חסרה במערב. היא מכילה רק כ-37% מן הקרום החסר
4. הטבעת הפנימית (B5)	קיימת ב-22 מתוך 24 כיוונים, מרכזה מזרח-צפון-מזרח למרכז האגן, הדופן שלה תלולה ביותר בצפון-מזרח
5. הנקבוביות בעומק (B6)	פני השטח נקבוביים כמו הסביבה; הנקבוביות סגורות בעומק, ביותר במרכז, ונחלשות לעבר השפה. הערכים הוחצנו (אקסטרפולציה) מהיפוכים שפורסמו

חמשת המחקרים שהמאמר ערך בעצמו: הרמזור לגבי ההשערה של כל מחקר, מה עמד, והגבול של התוצאה. כל החמישה ירוקים.

כל שורה, כממצא וכמשמעותו:

- 1. תיעוד המכתשים (מחקר 1, B1).** ממצא: כשהמדידה נעשית באופן שווה בשני הצדדים — מישורי הल्בה, 34 הימות של מאמר 5 (*The Maria*) והילה של 200 ק"מ סביב כל אחד מוסרים משני צדי ההשוואה — הטבעת שבתוך 10° ממרכז האגן מכילה 0.51 מצפיפות המכתשים שממש מחוץ לשפה. החוסר מתחזק ככל שפני השטח הצעירים מוסרים (0.59 על כל הקרקע, 0.56 בלי מישורי הल्בה והימות, 0.51 כשגם ההילות מוסרות). המינימום שלו, ב- 45.4° דרום, 197.9° מזרח, נמצא על קו האורך של הנקודה שמול Serenitatis (197.9° לעומת 198.8°). לפי גודל, המכתשים של 20–40 ק"מ חסרים יותר מכול (0.47), והקטנים ביותר, של 10–20 ק"מ, כמעט אינם חסרים (0.91). מכתשים של 40–80 ק"מ ב- 20° המרכזיות רדודים ב-18% מאלה של חגורת השפה, והשפות שלהם גבוהות יותר מאשר בקבוצת ביקורת מותאמת. משמעות: זו התבנית של חום מלמטה, ולא של קרקע שפשוט קיבלה פחות מכתשים. מישורי לבה צעירים היו מטשטשים חוסר, ולא יוצרים אותו, ולכן חוסר שמתחדד על קרקע נקייה יותר שייך לפני השטח הוותיקים עצמם. החום מרפה ומוחק את המכתשים הגדולים שהוא מגיע אליהם, ואילו הקטנים ביותר נחתו מאוחר יותר מעליהם, בעיקר מחומר שכדור הארץ זרק אחרי הניתוק ושהתפזר באופן אחיד על הירח (B1h); וחום מלמטה מרפה מכתש ועושה אותו רדוד, ואילו מכתשים על קרקע דחוסה שומרים על שפות גבוהות (B1k). גבול: הספירות במרכז קטנות (29 מכתשים של 20 ק"מ ומעלה בטבעת המרכזית), וההבדל בצורה נשען על 31 מכתשים, שנמדדו מול חגורת שפה שבה המכתשים עמוקים באופן חריג.
- 2. העומק מול הקרום הדק (מחקר 2, B2).** ממצא: קרום דק עומד נמוך, כפי שקרש דק צף נמוך יותר במים מקרש עבה; האיזון הזה, שבו קרום קל צף על מעטפת צפופה יותר, נקרא איזוסטזיה. כשהמדידה נעשית על המישורים שבין המכתשים, SPA עמוק יותר ממה שהקרום הדק שלו מסביר לפי האיזון הזה: השארית היא 1.1–1.8 ק"מ במרכז, והיא יורדת ל-0.2–0.3 ק"מ בשפה. משמעות: העומק הנוסף גדול ביותר במקום שבו החום היה החזק ביותר ונחלש כלפי חוץ, כפי שדחיסה של שכבות מחוממות הייתה יוצרת. שארית של 1.1–1.8 ק"מ מתאימה לעמודה של 9–15 ק"מ שאיבדה 12% מן החללים שלה — הקרקע שקעה משום שהנקבוביות שלה נסגרו. גבול: המסה הצפופה שמתחת לאגן (B10) מושכת גם היא את פני השטח כלפי מטה ויכולה גם היא למלא את הפער; היא מצוינת כדי שהקורא יידע שסיבה שנייה יכולה לתרום לאותה שארית.
- 3. הטבעת החיצונית (מחקר 3, B4).** ממצא: אחרי שהמגמה האזורית של הצד הרחוק מוסרת, טבעת של קרום מעובה (3.8–5.7 ק"מ ב- 50° – 55° מן המרכז, בכל ארבעת מודלי הקרום של GRAIL) עומדת מעל הקרום שמחוצה לה בשבעה משמונה כיוונים; היא עבה במזרח וחסרה במערב. משמעות: כאן נח הקרום

שהחליק מן הכיפה העולה, נערם בשוליים. האסימטריה מזרח-מערב שלו היא אסימטריה ששום כיוון של מכה אלכסונית מבחוץ אינו חוזה. גבול: הטבעת מכילה רק כ-37% מן הקרום החסר באגן; השאר אינו נמצא בה, והטבעת הפנימית של מחקר 4 מכילה חלק ממנו במערב.

4. **הטבעת הפנימית (מחקר 4, B5).** ממצא: טבעת שנייה של קרום מעובה, קיימת ב-22 מתוך 24 כיוונים, שמרכזה כ-118 ק"מ מזרח-צפון-מזרח למרכז האגן (ב- 51.4° דרום, 196.8° מזרח), והדופן הפנימית שלה תלולה ביותר בצפון-מזרח (30.7 מ"ק"מ) ומתונה ביותר בדרום-מערב (11.5 מ"ק"מ). משמעות: הטבעת הזאת מסמנת את שולי הכיפה, ומרכזה נלקח כמרכז הכיפה. מרכז הכיפה אינו חופף למרכז האגן: הוא נמצא לעבר היציאות של הצד הקרוב, על נתיב החום שעבר דרכו, 29° מציאת Imbrium ו- 24° מציאת Serenitatis כיום (C.3).

5. **הנקבוביות בעומק (מחקר 5, B6).** ממצא: על פני השטח SPA נקבובי כמו הצד הרחוק שסביבו. בעומק של 10 ק"מ הנקבוביות שלו כמעט סגורות — 2.9%–4.4% במרכז, ועולות בהדרגה ל-7.1%–8.8% בשפה, לעומת 6.2%–12.8% בסביבה — בשני המודלים של ירידת הנקבוביות עם העומק. משמעות: הסגירה נמצאת בעומק והיא החזקה ביותר במרכז, אותו מבנה כמו העומק הנוסף של מחקר 2. החום בא מלמטה ודחס את השכבות העמוקות, ואילו פני השטח חודשו בחומר שנחת מאוחר יותר. גבול: הערכים בעומק הוחצנו מהיפוכים שפורסמו של שדה הכבידה ותלויים במודל העומק שנבחר; היפוך ישיר עבור SPA מופיע ברשימת העבודה הנוספת.

בסיכום: כל אחד מחמשת המחקרים נוסח מראש, לפני המדידה, וכל אחד יצא בצד שההשערה דרשה. הגבולות שלהם הם של גודל המדגם ושל השיטה, וכל גבול מצביע על מדידה שיכולה להסיר אותו.

6.2 מה המאמר הראה

המסקנות באות לפי סדר הטיעון. כל אחת מנוסחת כמה שנמצא ומה משמעותו.

1. **המרכז דל במכתשים, והמכתשים שלו רדודים.** ממצא: המרכז של South Pole–Aitken דל במכתשים ומכיל מכתשים רדודים; החוסר נוטה לעבר הנקודה שמול Serenitatis (B1, מחקר 1). משמעות: מרכז האגן איבד חלק מתיעוד המכתשים שלו, והאובדן אינו מפוזר באופן שווה אלא נוטה לעבר נקודה אחת שנקבעת על ידי הצד הקרוב. למכה מבחוץ אין סיבה לסדר את החוסר לפי נקודה שבצדו השני של הירח; למקור חום שהוזן מאותו צד יש.

2. **הקריאה: מקור חום מתחת לצד הרחוק.** ממצא וקריאה: אנו קוראים זאת כפעולה של מקור חום מתחת לצד הרחוק, מול הפתחים המכוסים של הצד הקרוב, שהחום שלו בא מלמטה והתיך את האזור, את חלקיו העבים והדקים כאחד; הוא פעל בזמן שהגוף היה מחובר, ושכך כשהפחיסות הרפתה, לפני השחרור. משמעות: למקור החום — הברנר של המאמר הזה — היו שתי יציאות בצד הקרוב, Imbrium הראשית ו-Serenitatis המשנית; החום שלו חצה את הגוף והיה החזק ביותר במרכז הכיפה שמתחת לצד הרחוק. זמן הפעולה שלו הוא השלב המחובר: לפחות 10^7 שנים, החסם ששימש להערכת הצמיגות, ובמודל כ-600 מיליון שנה בסך הכול, מתחילת הבליטה ועד השחרור לפני 3.873 מיליארד שנה. הפחיסות וההתעגלות של הירח התרחשו שתיהן בשלב הזה (מאמר 7, *The Poles*); בשחרור הגוף היה עגול והקליפה החיצונית שלו קשיחה (מאמר 2, *LEF Mechanism in Principle*, §B.7). הברנר שכך אפוא לפני השחרור; אחריו פעל רק חום שיורי, שדעך לאט.

3. **התיעודים האחרים מתאימים לאותה קריאה.** ממצא: העומק, שתי הטבעות של הקרום המעובה, הנקבוביות הסגורות בעומק, הכימיה של Chang'e-6, המעטפת המחוזרת, הוולקניזם הארוך ותבנית המגנטיות מתאימים לקריאה הזאת. משמעות: כל אחד מאלה הוא תיעוד בלתי תלוי, וכל אחד מצביע על אותה סיבה. האגן עמוק יותר ממה שהקרום הדק שלו מסביר, ביותר במרכז (B2); הקרום שהחליק מן הכיפה

מונח בטבעת חיצונית ובטבעת פנימית (B4, B5); הנקבוביות סגורות בעומק, ביותר במרכז (B6); הדגימות של Chang'e-6, כ-210 ק"מ ממינימום המכתשים, מראות מעטפת שאיבדה את החומרים הנדיפים שלה בחימום (B11); המעטפת שמתחת ל-SPA דלה יותר בחמצן מזו שמתחת לצד הקרוב ($\Delta IW -1.93$ – לעומת -0.80 , B12), כפי שחום ממושך וברזל מתכתי היו יוצרים; התכה עלתה לאורך תקופה ארוכה, מלפני 4.25 ועד לפני 2.2 מיליארד שנה (B15), כפי שמקור אחד ארוך-חיים היה מספק ומכה קצרה אחת לא; והמגנטיות מחוקה במרכז וחזקה בצד המאסף, באותו צד כמו סהר התוריום, לא באותו מקום (B16). בספירה של B18 המודל מתאים לשש-עשרה משבע-עשרה האנומליות ולאחת באופן חלקי, והמדידות מסודרות סביב מרכז אחד, בשכבות לפי עומק – החתימה של מקור חום אחד, ארוך-חיים וממוקד.

4. **ראי קשיח של הצד הקרוב אינו יוצר את צורת האגן – והתוצאה נשמרת.** ממצא: ראי קשיח של האגנים של הצד הקרוב אינו משחזר את צורת האגן, והתוצאה הזאת נשמרת. העתקת הטבעות והימות של Imbrium ושל Serenitatis אל הנקודות שמולן נותנת מעטפות עם יחסי צירים של 1.60 ושל 1.72, לעומת 1.17 עבור SPA, והכיוונים אינם מתאימים (C.2). משמעות: הברנר אינו חותמת שהטביעה את קו המתאר של האגנים של הצד הקרוב על הצד הרחוק. מה שהוא קובע הוא היכן נמחקו המכתשים; קו המתאר של האגן נקבע על ידי הכיפה, הקריסה שלה והקרום שהחליק ממנה. התוצאה השלילית מסמנת מה הברנר ומה הוא לא, והיא מדווחת כפי שנמדדה.

5. **המרכזים נמצאים על קו אחד מצפון לדרום, בשלוש קבוצות.** ממצא: המרכזים נמצאים בשלוש קבוצות לאורך קו אחד מצפון לדרום – שתי היציאות, המרכז החם, הדרום הצפוף (איור C.1). בצפון נמצאות הנקודות של שתי היציאות בצד הרחוק, ומעל כל אחת כיפה קטנה של קרום דק (Ingenii, Apollo); באמצע, בתוך 6° ממרכז הכיפה, מרכז האגן, שיא המגנטיות הקרוב ביותר למינימום ומינימום המכתשים; בדרום, בתוך כ-230 ק"מ זה מזה, הקרקע הנמוכה ביותר שבין המכתשים, המסה הצפופה והקרום הדק ביותר (C.3). משמעות: המדידות של חלק B, שכל אחת מהן נותנת מרכז משלה, אינן מפוזרות: הן מסתדרות בשורה מן היציאות, דרך המרכז החם, אל המקום שבו הברזל מרוכז. זה הסדר שנתיב חום מן היציאות אל כיפה שמדרום להן היה משאיר.

6. **הכיוון הדרומי נקבע על ידי האגס ועל ידי הסיבוב, ומוגדל על ידי ההתעגלות.** ממצא: הכיפה נמצאת מדרום לשתי היציאות, כיוון שנקבע על ידי מיקום האגס ועל ידי כוחות הסיבוב, ומוגדל על ידי ההתעגלות של הגוף הפחוס (C.4). קצה האגס, ועליו הירח, עמד בכ- 22.5° צפון, ובסיסו בערך על המשווה של אותו זמן; בתוך האגס המסתובב הדחיפה ניצבת לציר הסיבוב של כדור הארץ, ולא לאורך הקו אל מרכז כדור הארץ, ולכן החום הגיע אל דסקת המגע מצפון למרכזה, היכן ששתי היציאות נמצאות, ויצא בצד הרחוק מדרום לנקודה שמול מרכז המגע. בשלב הפחוס מרכז הכיפה כבר היה 17° מדרום ליציאת Serenitatis ו- 21° מדרום-מזרח ליציאת Imbrium; השינוי של הגוף מצורה פחוסה לכדור הביא את המרחקים האלה ל- 24° ול- 29° הנמדדים כיום. משמעות: המיקום הדרומי של הכיפה אינו פרמטר חופשי שהותאם למפה; הוא נובע מן המקום שבו עמד האגס על כדור הארץ ומן הסיבוב. ההתעגלות אינה מזיזה דבר על פני השטח; היא משנה את הצורה, ואיתה את המרחקים, וכך היא מרחיבה הפרדה שכיוונה נקבע לפניה.

7. **הציר של כדור הארץ נשאר לעבודה עתידית.** ממצא: שינוי של ציר כדור הארץ אחרי הניתוק עשוי גם הוא לגרום ל-SPA להיראות שלא בקו אחד עם הברנר; הצירים הושארו במכוון לעבודה עתידית. משמעות: הכיוון של הברנר נקרא כיום במערכת ייחוס הקבועה על ידי ציר הסיבוב של כדור הארץ, מישור המסלול של הירח והצירים של הירח עצמו. אם ציר כדור הארץ השתנה אחרי הניתוק, מערכת הייחוס השתנתה יחד איתו, ו-SPA יכול להיראות שלא בקו אחד עם הברנר אף שהחום אכן הלך לאורכו (C.4). המאמר הזה אינו נכנס לחקר הצירים, ושום מסקנה כאן אינה תלויה בו.

8. **את התחזית החדה ביותר קוראים באיזוטופים.** ממצא: את התחזית החדה ביותר של המאמר – שהמתכת בנוריטים העתיקים של הירח ארצית, ושחומר זר, אם בכלל, נמצא בכמויות זעירות בלבד –

קוראים באיזוטופים במתכות של הנוריתים העתיקים. משמעות: התחזית נוגעת לחומר שהיה חלק מדגימה כשזו נוצרה, כמו מתכת הברזל-ניקל שבתוך שני הנוריתים המתוארכים של Chang'e-6 (B14, חלק F); גרגירים דקים של אבק חלל שנמשכו מאוחר יותר אל שכבת פני השטח הרופפת, או מטאוריט בודד, הם בין אותן כמויות זעירות (E.1, E.7). יחסי יסודות כמו Ni/Co, אירידיום או זהב אינם יכולים להבחין בין מתכת מפנים כדור הארץ לבין מתכת של גוף זר, שכן שתיהן עשירות ביסודות הנלווים לברזל; מערכות איזוטופיות (Cr, Ti, Mo, Ru, Os) יכולות. חתימה ארצית במתכת הזאת תומכת במודל.

במשפט אחד: המרכז הדל במכתשים של South Pole–Aitken, העומק שלו, הטבעות שלו, הנקבוביות הסגורות שלו, הכימיה שלו והמגנטיות שלו נקראים כתיעוד של מקור חום אחד מתחת לצד הרחוק, שהוזן דרך Imbrium ו-Serenitatis בזמן שהירח היה מחובר, והמדידות שנקובות בחלק F ממשיכות אותה הלאה.

עבודה נוספת: מודל פיזיקלי של ציר החום ושל תקציב האנרגיה שלו; תקציב חמצון-חיזור (redox) לחיזור; חישוב מחדש של המבחנים הדינמיים עם הקבועים שנבחרו; המבחנים של חלק F; וכעבודה עתידית, מערכת הצירים של הירח בזמן ההתעגלות. בפירוט:

1. **מודל פיזיקלי של ציר החום ושל תקציב האנרגיה שלו.** המאמר ממקם את נתיב החום לפי הסימנים שלו: שתי יציאות בצד הקרוב, כיפה ומרכז חם בצד הרחוק. מה שנותר הוא הפיזיקה של הנתיב עצמו — כיצד החום חצה את הגוף המחובר מן היציאות אל הקרום של הצד הרחוק, וכמה אנרגיה הוא נשא. *מה זה יראה:* אם החום שהגיע במהלך השלב המחובר מספיק כדי לדחוס את העמודה של מחקר 2, לסגור את הנקבוביות של מחקר 5 ולמחוק את המכתשים של מחקר 1.
2. **תקציב חמצון-חיזור לחיזור.** המעטפת שמתחת ל-SPA דלה יותר בחמצן מזו שמתחת לצד הקרוב (B12). המודל קורא זאת כחמצן שגורש על ידי החום ונצרך על ידי ברזל מתכתי מפנים כדור הארץ. *מה זה יראה:* כמה חום וכמה ברזל נדרשים כדי להוריד את רמת החמצן בשיעור שנמדד, ואם השניים מתאימים לתקציב החום של הפריט הקודם.
3. **חישוב מחדש של המבחנים הדינמיים עם הקבועים שנבחרו.** את המבחנים של חלק D — מהירות זמן מעבר, אנרגיה ולחץ, מחסום הפוטנציאל וההקלה שלו בגוף רציף, מבחן הסימן וזווית היציאה — יש לחזור ולבצע עם הקבועים שהסדרה קבעה: יממת כדור הארץ בשחרור, 5.77 שעות, רדיוס הקורטוציה — המרחק שבו גוף שמסתובב עם כדור הארץ כבר נע במהירות של מסלול חופשי — של המצב הזה, ומסת האם של הסדרה. *מה זה יראה:* את המחסום האפקטיבי ואת לחץ הבסיס עבור גוף בצורה ובגודל של מאמר 3 (LEF Mechanism in Practice), כנדרש ב-D.3a.
4. **המבחנים של חלק F.** התחזיות של חלק F שדורשות נתונים חדשים מפורטות שם: המינימום המרחבי של העומק אחרי מסכת הימות, ספירה של מכתשים עם רצפה סדוקה, תוריום, תחמוצת ברזל והידרוקסיל שנדגמו במינימום ובטבעות, העומק והכיוון של המגנט, מבחן אפס לבחירה ב-Serenitatis מבין כל הפתחים, מבחן מחוץ למדגם, ובדיקה, מכתש אחר מכתש, של המכתשים הקטנים היושבים על מכתשים מארחים גדולים. *מה הם יראו:* כל אחד מהם מודד ישירות תחזית של חלק F.
5. **מערכת הצירים של הירח בזמן ההתעגלות (עבודה עתידית).** כעבודה עתידית, ולא כחלק מן המאמר הזה: הכיוון של צירי הירח, ושל ציר כדור הארץ, בזמן ההתעגלות ואחרי הניתוק. *מה זה יראה:* את מערכת הייחוס שבה נקבע הכיוון של הברנר, ומכאן עד כמה שינוי של הצירים מוסיף להבדל הנראה בין SPA לבין הברנר (C.4).

- Andrews-Hanna, J.C., Bottke, W.F., Broquet, A. et al. (2025). Southward impact excavated magma ocean at the lunar South Pole–Aitken basin. *Nature* 646, 297–302. doi:10.1038/s41586-025-09582-y.
- Avdellidou, C., Price, M.C., Delbo, M., Ioannidis, P. & Cole, M.J. (2016). Survival of the impactor during hypervelocity collisions – I. An analogue for low porosity targets. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 456, 2957–2965. doi:10.1093/mnras/stv2844.
- Besserer, J., Nimmo, F., Wieczorek, M.A. et al. (2014). GRAIL gravity constraints on the vertical and lateral density structure of the lunar crust. *Geophys. Res. Lett.* 41, 5771–5777. doi:10.1002/2014GL060240.
- Bhatt, M., Wöhler, C., Dhingra, D. et al. (2018). Compositional studies of Mare Moscoviense: new perspectives from Chandrayaan-1 VIS–NIR data. *Icarus* 303, 149–165. doi:10.1016/j.icarus.2017.10.009.
- Blewett, D.T., Coman, E.I., Hawke, B.R., Gillis-Davis, J.J., Purucker, M.E. & Hughes, C.G. (2011). Lunar swirls: examining crustal magnetic anomalies and space weathering trends. *J. Geophys. Res.* 116, E02002. doi:10.1029/2010JE003656.
- Checketts, B. et al. (2023). Global mapping of dark halo craters on the Moon. *54th Lunar and Planetary Science Conference*, LPI Contrib. 2806, abstract 1412.
- Chuang, F.C. et al. (2025). Application of machine learning techniques to distinguish between mare, cryptomare, and light plains in central lunar South Pole–Aitken basin. *Planet. Sci. J.* 6, 35. doi:10.3847/PSJ/ada4a6.
- Citron, R.I., Smith, D.E., Stewart, S.T., Hood, L.L. & Zuber, M.T. (2024). The South Pole–Aitken basin: constraints on impact excavation, melt, and ejecta. *Geophys. Res. Lett.* 51, e2024GL110034. doi:10.1029/2024GL110034.
- Cui, Z., Yang, Q., Zhang, Y.-Q. et al. (2024). A sample of the Moon's far side retrieved by Chang'e-6 contains 2.83-billion-year-old basalt. *Science* 386, 1395–1399. doi:10.1126/science.adt1093.
- Deca, J., Hemingway, D.J., Divin, A., Lue, C., Poppe, A.R., Garrick-Bethell, I., Lembège, B. & Horányi, M. (2020). Simulating the Reiner Gamma swirl: the long-term effect of solar wind standoff. *J. Geophys. Res. Planets* 125, e2019JE006219. doi:10.1029/2019JE006219.
- Fassett, C.I., Head, J.W., Kadish, S.J., Mazarico, E., Neumann, G.A., Smith, D.E. & Zuber, M.T. (2012). Lunar impact basins: stratigraphy, sequence and ages from superposed impact crater populations measured from Lunar Orbiter Laser Altimeter (LOLA) data. *J. Geophys. Res.* 117, E00H06. doi:10.1029/2011JE003951.
- Garrick-Bethell, I. & Zuber, M.T. (2009). Elliptical structure of the lunar South Pole-Aitken basin. *Icarus* 204, 399–408. doi:10.1016/j.icarus.2009.05.032.
- Goossens, S., Sabaka, T.J., Wieczorek, M.A. et al. (2020). High-resolution gravity field models from GRAIL data and implications for models of the density structure of the Moon's crust. *J. Geophys. Res. Planets* 125, e2019JE006086. doi:10.1029/2019JE006086.

- He, H., Li, L., Hu, S. et al. (2025). Water abundance in the lunar farside mantle. *Nature* 643, 366–370. doi:10.1038/s41586-025-08870-x
- Head, J.W., Wang, X., Lark, L.H., Wilson, L. & Qian, Y. (2024). Lunar nearside–farside mare basalt asymmetry: the combined role of global crustal thickness variations and South Pole–Aitken (SPA) basin-induced lithospheric thickening. *Geophys. Res. Lett.* 51, e2024GL110510. doi:10.1029/2024GL110510
- Hemingway, D. & Garrick-Bethell, I. (2012). Magnetic field direction and lunar swirl morphology: insights from Airy and Reiner Gamma. *J. Geophys. Res.* 117, doi:10.1029/2012JE004165
- Hemingway, D.J. & Tikoo, S.M. (2018). Lunar swirl morphology constrains the geometry, magnetization, and origins of lunar magnetic anomalies. *J. Geophys. Res. Planets* 123, doi:10.1029/2018JE005604
- Hood, L.L. & Artemieva, N.A. (2008). Antipodal effects of lunar basin-forming impacts: initial 3D simulations and comparisons with observations. *Icarus* 193, 485–502. doi:10.1016/j.icarus.2007.08.023
- Hood, L.L., Richmond, N.C. & Spudis, P.D. (2013). Origin of strong lunar magnetic anomalies: further mapping and examinations of LROC imagery in regions antipodal to young large impact basins. *J. Geophys. Res. Planets* 118, 1265–1284. doi:10.1002/jgre.20078
- Hood, L.L., Torres, C.B., Oliveira, J.S., Wieczorek, M.A. & Stewart, S.T. (2021). A new large-scale map of the lunar crustal magnetic field and its interpretation. *J. Geophys. Res. Planets* 126, e2020JE006667. doi:10.1029/2020JE006667
- Housen, K.R. & Holsapple, K.A. (2003). Impact cratering on porous asteroids. *Icarus* 163, 102–119. doi:10.1016/S0019-1035(03)00024-1
- Housen, K.R., Holsapple, K.A. & Voss, M.E. (1999). Compaction as the origin of the unusual craters on the asteroid Mathilde. *Nature* 402, 155–157. doi:10.1038/45985
- Hu, J., Liu, J., Liu, J., Deng, J., Zhang, S., Lei, D., Zeng, X. & Huang, W. (2024). The geological investigation of the lunar Reiner Gamma magnetic anomaly region. *Remote Sensing* 16, 4153. doi:10.3390/rs16224153
- Huang, Q. & Wieczorek, M.A. (2012). Density and porosity of the lunar crust from gravity and topography. *J. Geophys. Res.* 117, E05003. doi:10.1029/2012JE004062
- Ivanov, M.A., Hiesinger, H., van der Bogert, C.H., Orgel, C., Pasckert, J.H. & Head, J.W. (2018). Geologic history of the northern portion of the South Pole-Aitken basin on the Moon. *J. Geophys. Res. Planets* 123, 2585–2612. doi:10.1029/2018JE005590
- Izquierdo, K., Sori, M.M., Checketts, B., Hampton, I., Johnson, B.C. & Soderblom, J.M. (2024). Global distribution and volume of cryptomare and visible mare on the Moon from gravity and dark halo craters. *J. Geophys. Res. Planets* 129, e2023JE007867. doi:10.1029/2023JE007867
- James, P.B., Smith, D.E., Byrne, P.K., Kendall, J.D., Melosh, H.J. & Zuber, M.T. (2019). Deep structure of the lunar South Pole-Aitken basin. *Geophys. Res. Lett.* 46, 5100–5106. doi:10.1029/2019GL082252
- Jones, M.J., Evans, A.J., Johnson, B.C. et al. (2022). A South Pole–Aitken impact origin of the lunar compositional asymmetry. *Science Advances* 8, eabm8475. doi:10.1126/sciadv.abm8475

- Kramer, G.Y., Jolliff, B.L. & Neal, C.R. (2008). Distinguishing high-alumina mare basalts using Clementine UVVIS and Lunar Prospector GRS data: Mare Moscoviense and Mare Nectaris. *J. Geophys. Res.* 113, E01002. doi:10.1029/2006JE002860
- Kramer, G.Y., Combe, J.-P., Harnett, E.M., Hawke, B.R., Noble, S.K., Blewett, D.T., McCord, T.B. & Giguere, T.A. (2011). Characterization of lunar swirls at Mare Ingenii: a model for space weathering at magnetic anomalies. *J. Geophys. Res.* 116, E04008. doi:10.1029/2010JE003669
- Krüger, T., Hergarten, S. & Kenkmann, T. (2018). Deriving morphometric parameters and the simple-to-complex transition diameter from a high-resolution, global database of fresh lunar impact craters ($D \geq 3$ km). *J. Geophys. Res. Planets* 123, 2667–2690. doi:10.1029/2018JE005545
- Lemoine, F.G., Goossens, S., Sabaka, T.J. et al. (2014). GRGM900C: a degree 900 lunar gravity model from GRAIL primary and extended mission data. *Geophys. Res. Lett.* 41, 3382–3389. doi:10.1002/2014GL060027
- Leshner, C.E. & Walker, D. (1986). Solution properties of silicate liquids from thermal diffusion experiments. *Geochim. Cosmochim. Acta* 50, 1397–1411. doi:10.1016/0016-7037(86)90313-3
- Li et al. (2026). Atomic condensation of Na and K vapor followed by oxidation in lunar impact glass beads revealed by Chang'E-6. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 119980. doi:10.1016/j.epsl.2026.119980
- Lin, R.P., Anderson, K.A. & Hood, L.L. (1988). Lunar surface magnetic field concentrations antipodal to young large impact basins. *Icarus* 74, 529–541. doi:10.1016/0019-1035(88)90119-4
- Liu et al. (2025). Discovery of crystalline Fe_2O_3 in returned lunar soils. *Science Advances* 11, eady5169. doi:10.1126/sciadv.ady5169
- Liu, X., Hao, J., Li, J. et al. (2026). Late bombardment of carbonaceous asteroids recorded in Chang'e-6 lunar metals. *J. Geophys. Res. Planets* 131, e2026JE009653. doi:10.1029/2026JE009653
- McDonough, W.F. & Sun, S.-s. (1995). The composition of the Earth. *Chem. Geol.* 120, 223–253. doi:10.1016/0009-2541(94)00140-4
- Melosh, H.J., Kendall, J., Horgan, B., Johnson, B.C., Bowling, T., Lucey, P.G. & Taylor, G.J. (2017). South Pole–Aitken basin ejecta reveal the Moon's upper mantle. *Geology* 45, 1063–1066. doi:10.1130/G39375.1
- Mitchell, D.L., Halekas, J.S., Lin, R.P. et al. (2008). Global mapping of lunar crustal magnetic fields by Lunar Prospector. *Icarus* 194, 401–409. doi:10.1016/j.icarus.2007.10.027
- Moriarty, D.P. & Pieters, C.M. (2018). The character of South Pole-Aitken basin: patterns of surface and subsurface composition. *J. Geophys. Res. Planets* 123, 729–747. doi:10.1002/2017JE005364
- Moriarty, D.P., Watkins, R.N., Valencia, S.N., Kendall, J.D., Evans, A.J., Dygert, N. & Petro, N.E. (2021). Evidence for a stratified upper mantle preserved within the South Pole–Aitken basin. *J. Geophys. Res. Planets* 126, e2020JE006589. doi:10.1029/2020JE006589
- Neumann, G.A., Zuber, M.T., Wieczorek, M.A. et al. (2015). Lunar impact basins revealed by Gravity Recovery and Interior Laboratory measurements. *Science Advances* 1, e1500852. doi:10.1126/sciadv.1500852

- Ohtake, M., Uemoto, K., Yokota, Y. et al. (2014). Geologic structure generated by large-impact basin formation observed at the South Pole-Aitken basin on the Moon. *Geophys. Res. Lett.* 41, .doi:10.1002/2014GL059478
- Parsons, B. & Sclater, J.G. (1977). An analysis of the variation of ocean floor bathymetry and heat flow with age. *J. Geophys. Res.* 82, 803–827. doi:10.1029/JB082i005p00803
- Pasckert, J.H., Hiesinger, H. & van der Bogert, C.H. (2018). Lunar farside volcanism in and around the South Pole-Aitken basin. *Icarus* 299, 538–562. doi:10.1016/j.icarus.2017.07.023
- Potter, R.W.K., Head, J.W., Guo, D., Liu, J. & Xiao, L. (2018). The Apollo peak-ring impact basin: insights into the structure and evolution of the South Pole–Aitken basin. *Icarus* 306, 139–149. .doi:10.1016/j.icarus.2018.02.007
- Prettyman, T.H., Hagerty, J.J., Elphic, R.C., Feldman, W.C., Lawrence, D.J., McKinney, G.W. & Vaniman, D.T. (2006). Elemental composition of the lunar surface: analysis of gamma ray spectroscopy data from Lunar Prospector. *J. Geophys. Res.* 111, E12007. .doi:10.1029/2005JE002656. Data: PDS LP_9001
- Robbins, S.J. (2019). A new global database of lunar impact craters >1–2 km. *JGR Planets* 124, .doi:10.1029/2018JE005592
- Smith, D.E., Zuber, M.T., Neumann, G.A. et al. (2010). Initial observations from the Lunar Orbiter Laser Altimeter (LOLA). *Geophys. Res. Lett.* 37, L18204. doi:10.1029/2010GL043751
- Sori, M.M. & Zuber, M.T. (2012). Anomalous shallowing of lunar impact craters in the South Pole-Aitken basin from Lunar Orbiter Laser Altimeter (LOLA) observations. *43rd Lunar and Planetary Science Conference*, abstract 2707
- Su, B. et al. (2025). South Pole–Aitken massive impact 4.25 billion years ago revealed by Chang’e-6 samples. *National Science Review* 12(6), nwaf103. doi:10.1093/nsr/nwaf103
- Tian, H.-C., Zhang, C., Li, W.-J. et al. (2026). Isotopic evidence for volatile loss driven by South Pole-Aitken basin–forming impact. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* 123, e2515408123. .doi:10.1073/pnas.2515408123
- Tsunakawa, H., Takahashi, F., Shimizu, H., Shibuya, H. & Matsushima, M. (2015). Surface vector mapping of magnetic anomalies over the Moon using Kaguya and Lunar Prospector observations. *J. Geophys. Res. Planets* 120, 1160–1185. doi:10.1002/2014JE004785
- Wakita, S., Johnson, B.C., Garrick-Bethell, I., Kelley, M.R., Maxwell, R.E. & Davison, T.M. (2021). Impactor material records the ancient lunar magnetic field in antipodal anomalies. *Nature Communications* 12, 6543. doi:10.1038/s41467-021-26860-1
- Wakita, S., Johnson, B.C., Andrews-Hanna, J.C. et al. (2026). A southward differentiated impactor forms the tapered shape of the South Pole–Aitken impact basin on the Moon. *Science Advances* 12, eaea1984. doi:10.1126/sciadv.aea1984
- Wang, X., Head, J.W., Chen, Y. et al. (2024). Lunar farside South Pole–Aitken basin interior: evidence for more extensive central cryptomaria in the South Pole–Aitken Compositional Anomaly (SPACA). *J. Geophys. Res. Planets* 129, e2023JE008176. doi:10.1029/2023JE008176
- Wang, X., Head, J.W., Wu, B. & Liu, J. (2026). The South Pole–Aitken basin interior, thorium distribution, and implications for Chang’E-6 samples. *Europlanet Science Congress 2026*,

.EPSC2026-624. doi:10.5194/epsc2026-624

- Wang, Y., Wu, B., Xue, H., Li, X. & Ma, J. (2021). An improved global catalog of lunar impact craters (≥ 1 km) with 3D morphometric information and updates on global crater analysis. *J. Geophys. Res. Planets* 126, e2020JE006728. doi:10.1029/2020JE006728. Data: Wang, Y. & Wu, B. (2020), LU1319373, Zenodo, doi:10.5281/zenodo.4605503
- Weiss, B.P. & Tikoo, S.M. (2014). The lunar dynamo. *Science* 346, 1246753. doi:10.1126/science.1246753
- Whitten, J.L. & Head, J.W. (2015). Lunar cryptomaria: physical characteristics, distribution, and implications for ancient volcanism. *Icarus* 247, 150–171. doi:10.1016/j.icarus.2014.09.031
- Wieczorek, M.A. (2018). Strength, depth, and geometry of magnetic sources in the crust of the Moon from localized power spectrum analysis. *J. Geophys. Res. Planets* 123, 291–316. doi:10.1002/2017JE005418. Model T2015_449: Zenodo, doi:10.5281/zenodo.3873648
- Wieczorek, M.A., Weiss, B.P. & Stewart, S.T. (2012). An impactor origin for lunar magnetic anomalies. *Science* 335, 1212–1215. doi:10.1126/science.1214773
- Wieczorek, M.A., Neumann, G.A., Nimmo, F. et al. (2013). The crust of the Moon as seen by GRAIL. *Science* 339, 671–675. doi:10.1126/science.1231530
- Zhang, H., Yang, W., Zhang, D. et al. (2025a). A more reduced mantle beneath the lunar South Pole–Aitken basin. *Nature Communications* 16, 6985. doi:10.1038/s41467-025-62341-5
- Zhang, Q.W.L., Yang, M.-H., Li, Q.-L. et al. (2025b). Lunar farside volcanism 2.8 billion years ago from Chang'e-6 basalts. *Nature* 643, 356–360. doi:10.1038/s41586-024-08382-0
- Zhou, Q., Yang, W., Chu, Z. et al. (2025). Ultra-depleted mantle source of basalts from the South Pole–Aitken basin. *Nature* 643, 371–375. doi:10.1038/s41586-025-09131-7
- Zhu, M.-H., Artemieva, N., Morbidelli, A., Yin, Q.-Z., Becker, H. & Wünnemann, K. (2019). Reconstructing the late-accretion history of the Moon. *Nature* 571, 226–229. doi:10.1038/s41586-019-1359-0
- Zuber, M.T., Smith, D.E., Lemoine, F.G. & Neumann, G.A. (1994). The shape and internal structure of the Moon from the Clementine mission. *Science* 266, 1839–1843. doi:10.1126/science.266.5192.1839