

THE LEF MODEL · A SERIES OF TWELVE PAPERS

Lunar Elevation & Fission

7. הקטבים

למה הקטבים צפופים

חלקים A-E

זהר דוראן

חוקר עצמאי, רמלה, ישראל

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

תרגום מלא לעברית של המאמר האנגלי · 15 באוקטובר 2026

בקטבים של הירח יש יותר מכתשים מאשר בקו המשווה שלו. בקטלוג של Robbins, מכתשים של 20 ק"מ ומעלה מונים 219 מכתשים למיליון קמ"ר בכיפה קוטבית של 30° סביב כל קוטב, לעומת 166 מכתשים למיליון קמ"ר בחגורת המשווה — יחס של 1.32 — ובמכתשים של 40 ק"מ ומעלה היחס עולה ל-1.51.

הספירה הגולמית הזו מנופחת: הימות ומישורי הבזלת, רצפות צעירות ודלות במכתשים, נמצאים ברובם סמוך לקו המשווה. בספירה הנקייה — הימות ו-South Pole-Aitken מוסרים משני הצדדים, כך שמשווי פני שטח עתיקים לפני שטח עתיקים — היחס הוא 1.20 ± 0.05 , והוא עולה עם גודל המכתש, מ-1.09 במכתשים של 20–30 ק"מ ועד 1.53 במכתשים של 60–100 ק"מ.

המדע הנוכחי גורס שאסטרואידים יצרו את מכתשי הירח; הסדרה הזו גורסת, במאמר 6, שהמכתשים נוצרו על ידי חומר ארצי חוזר שנחת על הקליפה. כך או כך, חומר שנופל מלמעלה — ארצי או חוץ-ארצי — אמור לנחות באופן אחיד. שני קטבים צפופים בשני הקצוות של ציר אחד אינם דגם שנפילה אחידה כלשהי יוצרת. משהו סידר את המכתשים לפי הציר.

אנו קוראים את הדגם כצורתו של הירח הצעיר, לאחר שקפאה ברשומה שלו. מסה סיאלית התאספה בקצה האגס, בצפיפות של כ-1,300 ק"ג/מ"ק, החלה לצאת ונפחסה, תחילה על בסיס ברוחב 6,000 ק"מ. ככל שנעה החוצה ובסיסה הצטמצם לעבר 3,000 ק"מ, היא קיבלה צורה וגוף משלה, עדיין מחוברת ומסתובבת עם כדור הארץ פעם בכ-5.5 שעות. היא הייתה פחוסה ביותר כשהתקרבה לבסיס של 3,000 ק"מ, סמוך לקו הקורוטציה — המרחק שבו גוף שמסתובב עם כדור הארץ כבר נע במהירות של מסלול חופשי — שם נמתחה בין שתי משיכות מנוגדות: הכבידה של כדור הארץ על הצד הקרוב שלה, פנימה, והמשיכה הצנטריפוגלית של הקורוטציה, החוצה. צורתה הייתה אז תלת-צירית, בערך 1.8 : 1.4 : 1 — ארוכה לכיוון כדור הארץ, בינונית לאורך המסלול וקצרה בקטבים: ביצה שהיא גם פיתה — והגוף המתוח היה נפוח, בצפיפות של כ-1,700 ק"ג/מ"ק. חומר הושלך וחזר במהלך הפחיסות ולפניה, ורוב המכתשים הגדולים נוצרו סמוך לשיאה. ברגע שמרכז המסה של הגוף עבר את קו הקורוטציה, המשיכה נטו שלחצה אותו על הבסיס שלו ירדה לאפס, והירח השתחרר מלמטה: הוא התעגל בירידת נפח — המתיחה השתחררה, והגוף נעשה קטן וצפוף יותר, 2,600 ק"ג/מ"ק — והשתחרר כ-210 ק"מ מעבר לקו, עגול, והקליפה שלו קשיחה. גוף פחוס שמתעגל מצופף את המכתשים שעליו הכי הרבה בקטבים והכי מעט במשווה. מכתשים שנוצרו הכי קרוב לשיא צופפו הכי הרבה; מכתשים שנוצרו על גוף שכבר היה כמעט עגול צופפו הכי מעט.

בדרך לתשובה על השאלה מדוע מספר המכתשים בקטבים גבוה יותר מאשר במקומות אחרים על הירח, עברנו שש תחנות, כל תחנה ניסיון לפתור את החידה; בשביעית עצרנו, כי שם נמצא הפתרון. התשובה השביעית בנויה מארבעה מבחנים, שמנותחים בפירוט בחלק D, ותוצאותיהם, לפי הסדר: (1) יחס הצפיפות בין הקטבים למשווה — בספירה הנקייה (הימות ו-South Pole-Aitken מוסרים, חגורת המשווה $15^\circ < |\phi|$), 1.20 ± 0.05 לכל המכתשים של 20 ק"מ ומעלה, העולה עם גודל המכתש מ-1.09 ל-1.53, כפי שסדר ההיווצרות חוזה; (2) קוטרי המכתשים — המכתשים נישאו שלמים על קליפה קשיחה ושמרו על גודלם, ולכן האוכלוסייה הקוטבית עשירה יותר במכתשים גדולים: באותו סף, החציון הקוטבי גדול פי 1.06 מהמשווי (1.01–1.12); (3) המכתשים הצעירים, שנוצרו לאחר שהירח היה עגול — 0.92 ו-1.12 בשני מדגמים בלתי תלויים, עקביים עם היעדר עודף, אף שהמדגמים קטנים מכדי להבדיל אותם מה-1.20 של האוכלוסייה העתיקה; (4) שני הקטבים זה מול זה — כש-SPA מוסר, 300 ו-305 למיליון קמ"ר, שווים בתוך שגיאת הספירה בכל כיפה. שלושה מבחנים עוברים; מבחן המכתשים הצעירים עקבי וממתין למדגם מתוארך גדול יותר. חמישה מבחנים נוספים של גודל — המכתשים הגדולים ביותר לשטח שווה, צורת התפלגות הגדלים,

מכתשים עתיקים מול טריים, האליפטיות, והמעבר ממכתש פשוט למורכב — שואלים אם המכתשים התכווצו עם פני השטח; ארבעה מוצאים שהגודל נשמר, ואף אחד אינו מוצא התכווצות.

מה המאמר מציג

הטענה. הירח הצעיר היה פחוס: כשנע החוצה על קצה האגס, עדיין מסתובב עם כדור הארץ פעם בכ-5.5 שעות, הוא נמתח בין הכבידה של כדור הארץ על הצד הקרוב שלו (פנימה) לבין המשיכה הצנטריפוגלית של הקורוטציה (החוצה), ובשיא הפחיסות, כשהתקרר לבסיס של 3,000 ק"מ סמוך לקו הקורוטציה, צורתו הייתה תלת-צירית, בערך 1.8 : 1.4 : 1 — ארוכה לכיוון כדור הארץ, בינונית לאורך המסלול וקצרה בקטבים — והגוף המתוח היה נפוח, בצפיפות של כ-1,700 ק"ג/מ"ק; מכתשים נוצרו על הצורה הזו באופן אחיד; לאחר שמרכז המסה שלו עבר את קו הקורוטציה, המשיכה נטו שלחצה את הגוף על הבסיס שלו ירדה לאפס, ובעודו מחובר הוא התעגל בירידת נפח — המתיחה השתחררה, והגוף נעשה קטן וצפוף יותר — והקליפה שלו קפאה, לפני השחרור — בשחרור הגוף היה עגול (יחס צירים של 1.04 לכל היותר, מאמר 2 B.78); ההתעגלות ציפפה את המכתשים הכי הרבה בקטבים והכי מעט במשווה, ביחס שנקבע לפי צורת הגוף הפחוס.

המספר. הצורה נקראת מרשומת המכתשים ונבדקת מול הפיזיקה. בספירה סביב ששת הקצוות של שלושת צירי הגוף (A.9), המכתשים של 20 ק"מ ומעלה נותנים את הצורה 1.37 : 1.15 : 1; התעגלות של הצורה הזו לכדור חוזה יחס נקי בין הקטבים לחגורה של 1.21, מול 1.19 שנמדד, בלי שום כיוונון. המכתשים הגדולים, שנוצרו קרוב יותר לשיא, קוראים בערך 1.8 : 1.4 : 1. שתי בדיקות בלתי תלויות קובעות את צפיפות הגוף בשיא: חלק הפיתה שלו, $b/c \approx 1.4$, הוא צורת Maclaurin (C.1) — צורת שיווי המשקל המדויקת של נוזל אחיד מסתובב — שסיבוב של 5.5 שעות מרים על גוף של 1,600–1,750 ק"ג/מ"ק; וכדי שקצות קו כדור הארץ יתכווצו בזמן שהגוף מתעגל, הצפיפות בשיא חייבת להיות מתחת לכ-1,800 ק"ג/מ"ק (C.3). (גוף נוזלי של 1,300 ק"ג/מ"ק בסיבוב הזה היה מקבל מן הסיבוב לבדו את הצורה הפחוסה 1.69; היא נשמרת כהקשר). מאוחר בהתעגלות, סמוך לסיבוב ולצפיפות של השחרור (5.77 שעות, 2,600 ק"ג/מ"ק), הצורה כ-1.20; בשחרור הגוף הקשיח היה עגול. התעגלות של צורת השיא לכדור משאירה את המכתשים שנוצרו עליה צפופים פי 1.49 בכיפות הקוטביות מאשר בחגורת המשווה; התעגלות מ-1.20 — פי 1.17. לכן התחזית אינה מספר אחד אלא **טווח שעולה ככל שהמכתשים נוצרו קרוב יותר לשיא:** כ-1.5 לאלה שנוצרו בשיא, כ-1.2 לאלה שנוצרו מאוחר בהתעגלות, סמוך לשחרור, ו-1.0 לאלה שנוצרו אחריו. בספירה הנקייה — הימות South Pole–Aitken מוסרים משני הצדדים, כיפות של 30° מול החגורה $|\phi| < 15^\circ$ — היחס הוא 1.20 ± 0.05 לכל המכתשים של 20 ק"מ ומעלה, והוא עולה עם הקוטר: 1.09 (20–30 ק"מ), 1.15 (30–40), 1.26 (40–60), **1.53** (60–100), 1.84 ± 0.38 (100–300). הסדר והטווח הם מה שהמאמר טוען (D.1–D.2).

מה היא דורשת. גוף רך מספיק בפנים כדי להתעגל בשלב המחובר, לפני השחרור, מתחת לקליפה קשיחה מספיק כדי לשמור על המכתשים שלה שלמים, ובגודלם, בזמן שהיא התקצרה בקטבים (C.7); וקליפה קשיחה מספיק כדי לשאת את הגוף מכ-1.20 מאוחר בהתעגלות אל גוף עגול בשחרור (C.1). הלחיצה של הגוף על הבסיס שלו, שיוורדת מכ-3 ג'יגה-פסקל אלף קילומטר לפני קו הקורוטציה לאפס על הקו, החזיקה את חלק הביצה של הצורה (אחיזה של כ-1–4 ג'יגה-פסקל, C.6); הקליפה התנגדה למתיחה שנשארת מעבר לקו, עד כ-20,100 ק"מ (C.6); לפני השטח שנסגרו בהתעגלות — רבע מהשטח הממוצע, כמחצית בקטבים — נקלטו בקליפה (C.7, E.3). הקצה הפונה הרחק מכדור הארץ, פסגת הכיפה של מאמר 3, לא התכווץ כקצה חופשי: הוא עומד עם הצד הרחוק (A.9). לעודף המכתשים בחצי המאסף יש שתי סיבות: הפתחים של הצד עצמו, שהחומר החוזר שהשליכו יצר מכתשים סביבם, וחומר שפיגר אחרי

הסיבוב ונחת מאחור, בצד המאסף (A.9; מאמר 6). הדרישות של המודל, ומה שיבחן אותן, מרוכזים במאמר 11 (הדרישות).

הערה על הערכים. צורת השיא, מסלול הצפיפות והמספרים הנגזרים מהם באים מחישוב ראשון ומצומצם; מחקר ממוקד עשוי לתת ערכים שונים במקצת, משוערים.

הסביבה שממנה מתחיל החישוב – (א) הגוף

הסביבה של הגוף המתהווה והנתונים שהמאמר משתמש בהם – כדי שהקורא יידע, לכל גודל, לאיזה שלב, לאיזה מרחק ולאיזה מצב הוא מתייחס. במודל LEF הירח לא הושלך מוגמר: הוא גדל כגוף שעמד על כדור הארץ, על קצה של המשך ארוך מחומרו של כדור הארץ עצמו (האגס), התרומם איתו, התחיל להיפרד כשמרכז המסה שלו הגיע למרחק שבו גוף שמסתובב עם כדור הארץ כבר נמצא במסלול חופשי – קו הקורוטציה – ושוחרר כ-210 ק"מ מעבר לו, כשהוא נמשך החוצה בכוח (מאמרים 2–4). המכתשים של המאמר הזה נוצרו על הקליפה שלו במהלך השלב המחובר הזה. הגדלים שלהלן קובעים את הסיבוב, את הצפיפות ואת המרחקים של השלב הזה; הטבלה הראשונה מתארת את הגוף, והשנייה את רשומת המכתשים ואת האופן שבו היא נספרת.

גודל או תנאי	ערך	מה הוא אומר לקורא	מקור או ייחוס
זמן הסיבוב בשלב המחובר, בפחיסות המרבית	כ-5.5 שעות (5.77 בשחרור)	כדור הארץ משלים סיבוב בזמן הזה, והגוף המחובר מסתובב איתו עד השחרור. האגס המתארך מאט את כדור הארץ, והליבה המתמרכזת מאיצה אותו (מאמר 2). סיבוב אחד בכל כמה שעות הוא מהיר: הסיבוב הזה הוא שפחס את הגוף הצעיר והרך.	מאמר 2
זמן הסיבוב לאחר הנעילה למסלול	כ-6.2 שעות בשחרור, 14 שעות ב-30,000 ק"מ, 41 שעות ב-60,000 ק"מ	לאחר השחרור הסיבוב העצמי של הגוף עוקב אחר המסלול שלו; ככל שהוא מתרחק, הסיבוב שלו מאט. בשלב הזה הגוף כבר עגול והקליפה שלו קשיחה; מה שהסיבוב והגאות עדיין מרימים עליו הוא בליטה קטנה של הגוף הקשיח (יחס צירים 1.03 ב-30,000 ק"מ, 1.00 ב-60,000 ק"מ), ולא הפחיסות המוקדמת, שנעלמה לפני השחרור.	מאמר 4

רדיוס הקורוטציה	16,331 ק"מ ביממה של 5.77 שעות (16,399 עם תיקון שני הגופים); 15,818 ק"מ ב-5.5 שעות	כאן המשיכה של כדור הארץ והתרומה הצנטריפוגלית במערכת המסתובבת שוות. מעבר למרחק הזה, כל עוד הגוף ממשיך להסתובב באותו קצב כמו כדור הארץ, המאזן של שני הרכיבים האלה מכוון החוצה. 16,399 ק"מ הם כ-2.6 רדיוסי כדור ארץ: במרחק הזה גוף שמסתובב עם כדור הארץ כבר נע במהירות של מסלול חופשי.	מאמר 2
צפיפות הגוף לאורך השלבים	1,300 למסה הסיאלית שהתאספה בקצה האגס, לפני הפחיסות → כ-1,700 בשיא הפחיסות → 2,600 בניתוק → 3,344 היום, בק"ג/מ"ק; רדיוסי הכדור השקול כ-2,380, 2,180, 1,890 ו-1,737 ק"מ	המודל עובר מגוף קל על קצה האגס לגוף מתוח ונפוח בשיא הפחיסות, לגוף צפוף ועגול בשחרור ולצפיפות של היום. גוף מתוח תופס נפח רב יותר; כשהמתיחה משתחררת הוא נעשה קטן וצפוף יותר (C.3). השלבים מפורטים בטבלת השלבים שלהלן. הצפיפות חשובה כאן משום שגוף קל נפחס יותר מגוף צפוף באותו סיבוב (C.1).	מאמר 3 B.2§; מאמר 2; C.1, C.3

מאמר 2; C.2, C.5	גבול רוש הוא המרחק מכדור הארץ שבתוכו הגאות של כדור הארץ חזקה מהכבידה העצמית של הגוף, כך שהגוף אינו יכול להחזיק צורה משלו. מכאן והלאה הגוף מחזיק צורה משלו בכבידה ובחוזק שלו, עדיין מחובר: הוא נפח כשהוא נע החוצה על בסיס שמצטמצם מ-6,000 לעבר 3,000 ק"מ, ומתעגל מאוחר יותר, לאחר שמרכז המסה שלו עבר את קו הקורטציה. גוף נוזלי חופשי בצפיפות 2,600 ק"ג/מ"ק יכול היה להחזיק את עצמו רק מעבר לגבול רוש הנוזלי, כ-20,000 ק"מ (19,971 ק"מ, מאמר 2; $k < 0.09$ מכ-20,100 ק"מ; גרסה קודמת נתנה כ-20,600 ק"מ), מרחק שהירח לא הגיע אליו לפני השחרור: בשחרור הוא הוחזק על ידי הקליפה הקשיחה שלו.	כ-13,000 ק"מ ב-1,300 ק"ג/מ"ק (10,314 ק"מ ב-2,600, מאמר 2; הגבול משתנה כ-$\rho^{-1/3}$)	גבול רוש הקשיח — הגוף מחזיק את עצמו
מאמרים 2 ו-4	הירח מתחיל להיפרד כשמרכז המסה שלו מגיע לקו הקורטציה, ומשתחרר כשקצת יותר ממחציתו (כ-58%) כבר עבר; המגע מתנגד מעט, והגוף נמשך החוצה בכוח. הגוף קשיח ועגול (יחס צירים של 1.04 לכל היותר, מאמר 2 B.7§), הרבה מעבר לגבול רוש הקשיח (10,314 ק"מ).	קו הקורטציה בכ-16,400 ק"מ על קו המשווה ביממה של 5.77 שעות, 17,287 ק"מ ב-22.5°; שחרור כ-210 ק"מ מעבר לו	רדיוס השחרור

טווח הפחיסות וההתעגלות	פחיסות מן המסה שעל קצה האגס ועד ההתקרבות לבסיס של 3,000 ק"מ סמוך לקו הקורוטציה; התעגלות לאחר שמרכז המסה עובר את הקו, ועד השחרור כ-210 ק"מ מעבר לו	הגוף יוצא על קצה האגס ונפחס כשהוא נע החוצה; הוא פחוס ביותר סמוך לקו; ברגע שמרכז המסה שלו עבר את הקו, המשיכה נטו שלחצה אותו על הבסיס נעלמת, והוא מתעגל ומתנתק. מאוחר בהתעגלות כשלושה רבעים מהפחיסות כבר נעלמו; בשחרור הגוף עגול.	הדיון הנוכחי; מאמר 3
לחץ המקור וההרמה	לחץ מקור של 150 ג'יגה-פסקל; 140 ג'יגה-פסקל מיוחסים להרמה עד הקורוטציה	הלחץ, שנוצר בכדור הארץ מן הסיבוב ומן המיזין, מזין ומרים חומר בתוך האגס ועובר דרכו אל הירח. האגס מרים את הירח, והקורוטציה מנתקת אותו. בניתוק הלחץ של כדור הארץ מפסיק להגיע לירח; אנו מציעים שהניתוק חשף את הפתחים של האגס ושחרר את הלחץ, כך ששום דבר כבר לא האריך את האגס (C.6).	מאמר A§ 3

הסביבה החישובית (א): הגוף.

הסביבה שממנה מתחיל החישוב — (ב) הרשומה והספירה

הטבלה השנייה קובעת מה נספר ועל איזה משטח. כל צפיפות במאמר היא מספר מכתשים מחולק בשטח; השורות שלהלן נותנות את הקטלוג שממנו באים המספרים, את האזורים שבהם הם נספרים, ואת הרדיוס שבו מחושבים השטחים.

גודל או תנאי	ערך	מה הוא אומר לקורא	מקור או ייחוס
מסת כדור הארץ לאחר העברת החומר	5.972×10^{24} ק"ג	מסת כדור הארץ שמשמשת בחישובי המשיכה והגאות לאחר העברת החומר אל הגוף הירחי.	מאמר 2
קיבוע צורת הירח	לפני 16 רדיוסי כדור ארץ; פחיסות מאובנת $f \approx 0.001$	המודל ממקם את קיבוע הצורה לפני שהגוף מגיע למרחק הזה. הדבר נוגע לצורת הגוף; השורה אינה קובעת שכל פנים הירח התמצק באותו זמן. הפחיסות המאובנת היא הסטייה הקטנה מכדור שהירח עדיין נושא היום, שקפאה בו מסיבוב מוקדם ומהיר יותר.	מאמר C.3§ 4
רשומת המכתשים	Robbins (2019): 6,973 מכתשים בקוטר ≥ 20 ק"מ; 2,329 בקוטר ≥ 40 ק"מ; ללא מסכה	שתי קבוצות הספירה שמשמשות להשוואת הצפיפויות. בספירת הבסיס אין הוצאה של אזורים כמו ימות ואגנים; הספירה הנקייה, שמסירה אותם משני הצדדים, מוגדרת ב-A.11.	מאמר B.8§ 11 — הציר וכלל הספירה ללא מסכה
הציר הפונה לכדור הארץ והקטבים	הנקודה הפונה לכדור הארץ: (0° צפון, 0° מזרח); הקטבים: $\pm 90^\circ$	חגורות המרחק הזוויתי נמדדות מהנקודה הפונה אל כדור הארץ. הכיפות הקוטביות מוגדרות סביב הקוטב הצפוני והקוטב הדרומי. אלה אזורי ספירה שונים, ויש להבחין ביניהם.	מאמר B.8§ 11; כלל המיפוי של מאמר 3
רדיוס הירח בחישובי השטח	1,737.4 ק"מ	הרדיוס שמשמש לחישוב השטחים של הכיפות והחגורות ולהמרת מספרי המכתשים לצפיפויות ליחידת שטח.	חישובי השטח של המאמר (הרדיוס הממוצע של IAU)

שלבי הניתוק — מה פועל על הגוף, וכיצד משתנה תפקיד החיבור

הטבלה פורשת את הרצף, מן המסה שהתאספה בקצה האגס ועד היום. עמודת הצורה נותנת את הצורה. בשיא זו הצורה התלת-צירית $a:b:c$ — הציר הארוך לכיוון כדור הארץ, הבינוני לאורך המסלול, הקצר דרך הקטבים — שנקראת מן המכתשים סביב ששת הצירים ונבדקת מול הסיבוב (A.9, C.1). בשורות ההתעגלות זהו יחס הצירים a/c — הרדיוס המשווני מחולק ברדיוס הקוטבי, 1.00 לכדור — של צורת Maclaurin של גוף הומוגני מסתובב בסיבוב ובצפיפות הנתונים (C.1): חלק הפיתה שנשאר אחרי שחלק הביצה השתחרר על הקו (C.4, C.6). בשורת השחרור זו הצורה של הגוף הקשיח (מאמר 2 §B.7). קראו את העמודה המוצללת מלמעלה למטה: הפחיסות גדלה כשהגוף יוצא ונע החוצה, מרבית כשהוא מתקרב לבסיס של 3,000 ק"מ סמוך לקו הקוורטציה, יורדת בהתעגלות לאחר שמרכז המסה עבר את הקו, ונעלמת בשחרור. עמודת הצפיפות עולה לאורך כל הרצף: מ-1,300 ק"ג/מ"ק למסה שהתאספה, לכ-1,700 בשיא, שבו הגוף המתוח עדיין נפוח, ועד 2,600 כשהמתיחה משתחררת בהתעגלות והנפח יורד (C.3). "כשלושה רבעים מהפחיסות נעלמו" פירושו שמתוך העודף של הציר הארוך בשיא על הציר הקוטבי (כ-0.8 מהרדיוס הקוטבי), נעלמו כ-0.6 ביחס של 1.20. השורות מן השיא ועד השחרור הן ההתעגלות פנימה של הסדרה; הרצף כולו התרחש בזמן שהגוף היה מחובר.

שלב	צפיפות	סיבוב	צורה	מצב
מסה שהתאספה בקצה האגס, בסיס 6,000 ק"מ (כ-8,991 ק"מ)	1,300	שעות 5.50	—	עדיין קצה האגס; מתחילה לצאת ולהיפח
גוף משלו, עדיין מחובר (גבול רש הקשיח, כ-13,000 ק"מ)	← 1,300	שעות 5.50	גדלה	נפח, נמתח ומתנפח כשהוא נע החוצה; הבסיס מצטמצם מ-6,000 לעבר 3,000 ק"מ
שיא הפחיסות: מתקרב לבסיס של 3,000 ק"מ, סמוך לקו	כ-1,700	שעות 5.50	1.8 : 1.4 : 1	נמתח בין הכבידה של כדור הארץ (פנימה) למשיכה הצנטריפוגלית (החוצה); לחוץ על הבסיס שלו
התעגלות, מרכז המסה מעבר לקו	1,700	שעות 5.55	1.40	הלחיצה על הבסיס נעלמה, חלק הביצה השתחרר; הנפח מתחיל לרדת
התעגלות	2,000	שעות 5.62	1.30	הגוף מתעבה
התעגלות	2,300	שעות 5.70	1.24	
מאוחר בהתעגלות	2,600	שעות 5.77	1.20	הקליפה מתקשחת; כשלושה רבעים מהפחיסות נעלמו
שחרור: כ-210 ק"מ מעבר לקו (הקו בכ-16,400 ק"מ)	2,600	שעות 5.77	≤1.04	עגול; קליפה קשיחה

בהתרחקות, 30,000 ק"מ	2,600	שעות 14	1.03	הסיבוב מאט; בליטה קטנה של הגוף הקשיח
בהתרחקות, 60,000 ק"מ	2,600	שעות 41	1.00	עגול
היום	3,344	ימים 27.3	1.00	עגול

שלבי הניתוק: צפיפות (ק"ג/מ"ק), זמן סיבוב וצורה. גוון עמודת הצורה מסמן את גודל הפחיסות.

שתי השורות שאחרי השחרור אינן ממשיכות את הפחיסות: הגוף כבר עגול וקשיח, וה-1.03 ב-30,000 ק"מ הוא הבליטה הקטנה שסיבוב שעדיין מהיר והגאות מרימים על גוף קשיח, והיא דועכת ל-1.00 ככל שהסיבוב מאט. בזמן, הסדרה ממקמת כ-600 מיליון שנה בין תחילת הבליטה לבין השחרור לפני 3.873 מיליארד שנה: בערך 400 מיליון שנה לבליטה ולאגס, כ-100 מיליון שנה לפחיסות, וכ-100 מיליון שנה מסוף הפחיסות ועד השחרור. זהו החלון שבו נוצרו המכתשים של המאמר הזה.

הערה על הערכים. צורת השיא והצפיפויות שבטבלה הזו באות מחישוב ראשון ומצומצם; מחקר ממוקד עשוי לתת ערכים שונים במקצת, משוערים.

הגדרות והערות לקריאה.

מונח	משמעותו בטבלה
ציר הגאות a	הציר לאורך הקו המחבר את הגוף לכדור הארץ.
ציר התנועה b	הציר בכיוון התנועה במסלול.
הציר הקוטבי c	הציר המחבר את הקטבים.
"מחזיק את עצמו"	מסוגל לשמור על צורה משלו במסגרת החישוב של גוף נזלי. אין פירושו שהמשיכה של כדור הארץ או הגאות נעלמות.
"ניתוק"	פתיחת שכבת המגע, כפי שהיא מוגדרת כאן.
הצפיפות לאורך הדרך	1,300 ק"ג/מ"ק למסה שהתאספה בקצה האגס; כ- 1,700 בשיא הפחיסות, שבו שתי בדיקות בלתי תלויות נותנות 1,600–1,750 (חלק הסיבוב של הצורה ב-5.5 שעות, C.1; הגבול של כ-1,800 שמתחתיו קצות קו כדור הארץ מתכווצים בזמן שהגוף מתעגל, C.3); 2,600 בשחרור. הערכים שבאמצע ההתעגלות הם שלבים ברצף, לא מסלול מחושב.
המרחקים 10,314 ו-12,994 ק"מ	גבול רוש הקשיח, $1.26 R_{\oplus} (\rho_{\oplus}/\rho)^{1/3}$, כאשר $R_{\oplus}$ הוא רדיוס כדור הארץ, $\rho_{\oplus}$ הצפיפות הממוצעת של כדור הארץ ו- ρ צפיפות הגוף: 10,314 ק"מ ב- 2,600 ק"ג/מ"ק (מאמר 2), 12,994 ק"מ ב- 1,300 , צפיפות הגוף היושב על קצה האגס. לגוף קל יותר יש אחיזה חלשה יותר בעצמו, ולכן הגבול שלו רחוק יותר. בשני הגוף מחזיק לראשונה צורה משלו, עדיין מחובר.

הגדרות והערות לקריאת טבלת השלבים.

המדד שבו משתמשים הוא

$$k = \frac{M_E}{\pi \rho r^3},$$

והסך שמשמש בטבלה לצורת שיווי משקל נזלית חופשית הוא $k < 0.09$. כאן M_E היא מסת כדור הארץ, ρ צפיפות הגוף ו- r המרחק שלו ממרכז כדור הארץ. במילים: k משווה את המתיחה הגאותית של כדור הארץ על הגוף לכבידה העצמית של הגוף. כש- k גדול, הגאות גוברת וגוף נזלי אינו יכול לשמור על צורה סגורה משלו; מתחת ל-0.09 הוא יכול. מאחר ש- r מופיע בחזקה שלישית, k יורד מהר ככל שהגוף מתרחק, ומאחר ש- ρ עומדת במכנה, גוף צפוף יותר מגיע לסף מוקדם יותר.

מבוא — השאלה והאופן שבו היא נבדקת

מה נספר. על פני הירח יש מכתשים — שקעים בצורת קערה שנוצרו במקום שבו חומר שהגיע מלמעלה פגע ונחת על פני השטח. קטלוג Robbins רושם את המיקום ואת הגודל של מכתשים עד קוטר של כקילומטר (Robbins, 2019). כדי לצמצם את ההשפעה של חוסר שלמות בזיהוי מכתשים קטנים, הניתוח התמקד תחילה במכתשים בקוטר 20 ק"מ ומעלה, והצפיפות שלהם הושוותה בין אזורים שונים. **הצפיפות היא מספר המכתשים ליחידת שטח**, ולכן היא מאפשרת השוואה גם בין אזורים בשטחים שונים: אזור גדול מכיל באופן טבעי יותר מכתשים מאזור קטן, ורק המספר למיליון קמ"ר אומר אם המכתשים שם עומדים קרוב יותר זה לזה.

איפה הם נספרים. בהשוואה הזו נמצא שבאזורי הקטבים צפיפות המכתשים גבוהה יותר מאשר בחגורת המשווה. הקטבים הגאוגרפיים הם שתי הנקודות שבהן ציר הסיבוב של הירח פוגש את פני השטח; הציר מאונך למישור המשווה. לצורך הניתוח במחקר הזה, האזור הקוטבי הוגדר ככיפה ברדיוס זוויתי של 30° סביב כל קוטב, כשהזווית נמדדת ממרכז הירח. הכיפה הצפונית משתרעת מקו רוחב 60° צפון ועד 90° צפון, והדרומית מ- 60° דרום ועד 90° דרום. חגורת המשווה הוגדרה בין קווי הרוחב 15° דרום ו- 15° צפון. כל מכתש שויך לאזור לפי מיקום המרכז שלו, וצפיפות המכתשים חושבה כמספרם באזור מחולק בשטחו.

הספירה הגולמית. הספירה כללה מכתשים בתוך הימות והאגנים, כולל אגן South Pole–Aitken (SPA); האזורים האלה לא הוצאו. הצפיפות של מכתשים בקוטר 20 ק"מ ומעלה הייתה 227 למיליון קמ"ר בכיפה הצפונית ו-211 בדרומית, לעומת 166 בחגורת המשווה. לדוגמה, בכיפה הצפונית נספרו 577 מכתשים על שטח של כ-2.54 מיליון קמ"ר. לשתי הכיפות שטח שווה, ולכן הצפיפות המשותפת שלהן הייתה כ-219 מכתשים למיליון קמ"ר — **בערך פי 1.32 מהצפיפות בחגורת המשווה**, כלומר גבוהה בכ-32%. כשהספירה הוגבלה למכתשים בקוטר 40 ק"מ ומעלה, יחס הצפיפות בין הכיפות הקוטביות לחגורת המשווה עלה לכ-1.51. הספירות הגולמיות האלה כוללות את הימות, שמורידים את הצפיפות המשווית; הספירה הנקייה, שעליה נשען המבחן, מפורטת ב-A.11 וב-D.1: 0.05 ± 1.20 .

מדוע הספירה הנקייה היא המבחן ההוגן. השאלה היא אם הקטבים והמשווה קיבלו, ושמרו, מכתשים באופן שונה בגלל צורת הגוף. כדי לענות עליה יש להשוות דבר לדבר דומה: פני שטח עתיקים ומלאי מכתשים בקטבים מול פני שטח עתיקים ומלאי מכתשים במשווה. שני סוגי קרקע שוברים את זה. הימות ומישורי הבזלת — הרצפות הכהות של מסכת הימות של LROC — הם רצפות צעירות: ים הוא פתח מעל כיפת הזנה, והמכתשים שעמדו עליו הומסו; מישור בזלת הוא קרום שהותך בחום הכללי של כדור הארץ. שניהם דלים במכתשים מסיבה שאין לה קשר לקו הרוחב. הם מכסים 22% מחגורת המשווה אבל רק 1% מהכיפות, ולכן ספירתם גורמת למשווה להיראות ריק יותר ממה שפני השטח העתיקים שלו הם באמת, ומנפחת את היחס. South Pole–Aitken, האגן הגדול ביותר על הירח, מחק את המכתשים של מרכזו; כרבע (24%) מהכיפות הקוטביות נמצא בתוכו, בעיקר בדרום, ולכן ספירתו גורמת לקטבים להיראות ריקים יותר, ומקטינה את היחס. הספירה הנקייה מסירה את הימות ואת SPA משני הצדדים — מהכיפות ומהחגורה כאחד — ומשווה את מה שנשאר. זו הספירה היחידה שבה אפשר לקרוא את ההבדל בין הקוטב למשווה כתכונה של פני השטח, ולא של רצפה שהתיעוד שלה אופס או של אגן אחד. כל מסקנה במאמר הזה נשענת עליה.

ההבדל בצפיפות מעלה את השאלה המרכזית של המאמר: כיצד נוצר באזורי הקטבים ריכוז גבוה יותר של מכתשים ליחידת שטח מאשר בחגורת המשווה?

הנחת המוצא. במסגרת מודל LEF, אוכלוסיית המכתשים העתיקה נוצרה מנחיתה של חומר ארצי חוזר על הקליפה, לפני שהתרוממה עם הירח; המכתשים הצעירים המעטים על הימות הם חומר ארצי מושלך שנלכד, עם תוספת מאוחרת של אבק חלל דק. מאמר 6 עוסק במנגנון ההשלכה, החזרה והנחיתה של החומר הזה. לצורך

בדיקת המנגנון במאמר הנוכחי נבחנת הנחת מוצא של כל המכתשים בפיזור אחיד ליחידת שטח, ובמיוחד הגדולים שבהם, על פני הגוף המתהווה בזמן שהיה פרוש על גוף האם — כדור הארץ — במצב של בליטה. ההנחה חשובה משום שהיא מוציאה את המקור מהשאלה: מה שלא יהיה שיצר את המכתשים, אם הוא פיזר אותם באופן אחיד, אז כל אי-אחידות שנראית היום חייבת לבוא מאוחר יותר, ממה שקרה לפני השטח שנשאו אותם.

על בסיס ההנחה הזו המחקר בוחן את השאלה: האם שינוי בצורת הגוף יכול להסביר את הצפיפות הגבוהה יותר של מכתשים באזורי הקטבים, ואם כן — מהו המנגנון הפיזיקלי שמאפשר זאת? במהלך הבדיקה בחנו שישה הסברים אפשריים והנחנו אותם בצד. ההסבר השביעי, שבו מתמקד המאמר, הוא ההתעגלות של הגוף ממצב פחוס לכדור כמעט מושלם. במיפוי הגאומטרי שנבחן, התהליך מכווץ את שטח אזורי הקטבים, כך שהמכתשים שנשמרו עליו מתקרבים זה לזה והצפיפות שלהם עולה.

התמונה: נקודות על בלון מעוך. לחצו בלון עגול בין שתי כפות ידיים שטוחות כך שיהפוך לצורה מעוכה ופחוסה, וציירו עליו נקודות באופן אחיד — אותו מספר נקודות על כל סנטימטר רבוע. על הבלון המעוך החלק העליון והתחתון רחבים ושטוחים, והשפה שמסביב לאמצע היא רצועה צרה ומעוקלת בחדות. עכשיו הרחיקו את הידיים ותנו לבלון להתעגל, ותנו לו לאבד מעט אוויר תוך כדי. החלק העליון והתחתון, הרחבים והשטוחים, מתכנסים לשתי כיפות עגולות קטנות: הנקודות שם מתקרבות מאוד זו לזו. השפה הצרה שמסביב לאמצע מתכנסת הכי מעט: הנקודות שם מתקרבות הכי מעט. אותן נקודות עומדות עכשיו בצפיפות בשני הקצוות של הציר והכי פחות סביב האמצע, אף שכל אחת מהן צוירה באופן אחיד. זה המנגנון של המאמר הזה. הירח הצעיר היה הבלון המעוך, פחוס כשנמשך על קצה האגס בזמן שהסתובב עם כדור הארץ; המכתשים שלו היו הנקודות, שנוצרו באופן אחיד על הקליפה שלו; ההתעגלות שלו, בירידת נפח כשהמתיחה השתחררה, לאחר שמרכז המסה שלו עבר את קו הקורוטציה ובעודו מחובר, הייתה הידיים שמתרחקות. הקטבים הם המקום שבו הנקודות מתקבצות משום שציר הסיבוב עובר דרכם: פחיסות הסיבוב הייתה סימטרית סביב הציר הזה, וכשהיא השתחררה, כל קו אורך נסוג בחזרה לעבר שתי הנקודות שהסיבוב מעולם לא הזיז (C.3). הקליפה הייתה קשיחה מספיק כדי לשאת את המכתשים שלמים, כך שהמכתשים עצמם שמרו על גודלם; מה שהצטמצם היה פני השטח שביניהם (C.7).

מה התמונה חוזה. מידת הציפוף תלויה בכמה הגוף היה פחוס כשמכתש נוצר. מכתש שנוצר בשיא הפחיסות, על הצורה 1.8 : 1.4 : 1, נישא לאורך ההתעגלות כולה ומסיים צפוף פי 1.49 בכיפות מאשר בחגורה. מכתש שנוצר כשהגוף כבר התעגל ל-1.20, מאוחר בהתעגלות, מסיים צפוף רק פי 1.17. מכתש שנוצר לאחר השחרור, על גוף עגול, אינו מצופף כלל. חומר הושלך במהלך הפחיסות ולא רק בשיאה, ולכן הציפוף של מכתש רושם כמה קרוב לשיא הוא נוצר, ולא פשוט כמה מוקדם. רוב המכתשים הגדולים נוצרו סמוך לשיא ההשלכה והחזרה של החומר, ולכן המודל חוזה יחס שעולה ככל שהמכתשים נוצרו קרוב יותר לשיא, ולכן גם עם גודלם: כ-1.5 לאלה שנוצרו בשיא, כ-1.2 לאלה שנוצרו סמוך לשחרור, ו-1.0 לאלה שנוצרו אחריו. לאוכלוסייה כולה ששת הצירים נותנים בדיקה ישירה: הם קוראים את הצורה 1.37 : 1.15 : 1, שחוזה 1.21 (A.9). הטבלה שלהלן מציבה את הטווח החזוי לצד מה שנמדד.

חזוי, לפי הצורה בזמן ההיווצרות (C.3)		נמדד, ספירה נקייה (D.2)	
שלב	צורה	כיפות/חגורה	קוטר המכתש
שיא הפחיסות	1.8 : 1.4 : 1	1.49	300–100 ק"מ
מעבר לקו, הביצה השתחררה	1.40	1.34	100–60 ק"מ
התעגלות, אמצע	1.30	1.26	60–40 ק"מ
מאוחר בהתעגלות	1.20	1.17	40–30 ק"מ

1.09 ± 0.07	30–20 ק"מ	1.0	1.0	לאחר השחרור (עגול)
1.20 ± 0.05	כל המכתשים ≥ 20 ק"מ	1.21	1.37 : 1.15 : 1	כל המכתשים ≥ 20 ק"מ (ששת הצירים)

הציפוף החזוי לפי הצורה בזמן ההיווצרות, לצד היחס הנמדד בספירה הנקייה לפי קוטר המכתש.

את שני חצאי הטבלה קוראים יחד מלמעלה למטה: משמאל הציפוף יורד ככל שהגוף מתעגל; מימין הוא יורד ככל שהמכתשים קטנים יותר. הצבע מסמן את גודל העודף. הערכים הנמדדים משתרעים על הטווח החזוי ושומרים על הסדר שלו: המכתשים הקטנים ביותר נמצאים סמוך ליחס הצפוי למכתשים שנוצרו מאוחר, המכתשים של 100–60 ק"מ סמוך ליחס הצפוי למכתשים שנוצרו בשיא, והאוכלוסייה כולה של 20 ק"מ ומעלה ב-1.20 ± 0.05, כשה-±" הוא אי-הוודאות של הספירה, לצד ה-1.21 שהצורה שלה בששת הצירים חוזה. המחלקה הגדולה ביותר, 300–100 ק"מ, מכילה מעט מכתשים ונושאת אי-ודאות רחבה. בקריאה בכיוון ההפוך, כל יחס נמדד מרמז על צורת הגוף כשמחלקת המכתשים הזו נוצרה: 1.05 : 1.03 : 1, 1.11 : 1.07 : 1, 1.34 : 1.21 : 1, 1.70 : 1.42 : 1 ו-2.24 : 1.74 : 1, מהמחלקה הקטנה ביותר ועד הגדולה ביותר (D.2); המכתשים של 100–60 ק"מ קוראים בחזרה את צורת השיא. ההצמדה של שני החצאים שורה לשורה היא מדריך לקריאה, ולא טענה שכל מחלקת גודל נוצרה בדיוק בשלב הזה.

סדר המאמר. בהמשך המאמר מוצגים ששת ההסברים שנבחנו, עם הסיבות לכך שאינם מתאימים, ואחריהם המנגנון הפיזיקלי של ההתעגלות והחישוב של שינויי השטח שמלווים אותה. חלק A פורש את התצפית — הספירות לפי קו רוחב, לפי קו אורך, בכיפות וסביב שישה צירים, גולמיות ונקיות; חלק B — ששת ההסברים שהונחו בצד; חלק C — המנגנון והמספרים שלו; חלק D — ארבעת המבחנים; חלק E — מה שנשאר.

המאמר הזה מתמקד בעודף צפיפות המכתשים באזורי הקטבים ובאפשרות להסביר אותו בשינוי בצורת הגוף. לצורך הבדיקה מחושבים שינויי השטח שנובעים מהמעבר מגוף פחוס לכדור כמעט מושלם, כמו הירח היום, כיחס בין הקטבים למשווה, ונבחנת ההשפעה שלהם על צפיפות המכתשים בקטבים לעומת חגורת המשווה.

מדוע המכתשים שומרים על גודלם. קטלוג Robbins רושם את המכתשים לפי המיקום והקוטר הנוכחי שלהם. מתוך הקטלוג נבחרו לספירה הראשונית במחקר רק מכתשים שקוטרם היום 20 ק"מ ומעלה; מכתשים קטנים מהסף הזה לא נכללו בה.

מומחה ישאל מיד: אם פני השטח הקוטביים התכווצו, האם המכתשים הקוטביים לא התכווצו איתם, כך שחלקם ירדו מתחת ל-20 ק"מ ונשרו מהספירה? במסגרת המודל המכתשים אינם מתכווצים עם פני השטח: הם נישאו שלמים על קליפה קשיחה, והתכווצות פני השטח הקוטביים סגרה את המרווחים שביניהם (C.7). הקטרים של היום הם הקטרים המקוריים שלהם, והסף של 20 ק"מ זהה בקטבים ובמשווה. אילו המכתשים היו מתכווצים עם פני השטח, הציפוף היה בלתי נראה בכל סף קבוע (D.2): יותר מכתשים ליחידת שטח, אבל כל אחד קטן יותר, כך שחלקם היו יורדים מתחת לסף; בהתפלגות הגדלים של מכתשי הירח שתי ההשפעות מבטלות זו את זו, והספירה מעל הסף לא הייתה עולה. העודף שנמדד הוא לכן בעצמו ראיה לכך שהמכתשים שמרו על גודלם, וחלק D בודק זאת ישירות.

מטרת הבדיקה היא לקבוע עד כמה ההתעגלות, בהתחשב בשינוי השטח, מסבירה את ההבדל בין צפיפות המכתשים בקטבים לבין צפיפותם בחגורת המשווה.

חלק A — התצפית

חלק A מציג את מה שנצפה, לפני שנאמר דבר על האופן שבו זה נוצר. התצפית היא ספירה: כמה מכתשים יש בכל חלק של הירח, מחולק בשטחו של אותו חלק. בחלק זה נעשות ארבע ספירות, על אותו קטלוג מכתשים ובאותה שיטה. A.1 חותך את הירח לרצועות של קו רוחב — טבעות המקיפות את הירח במקביל לקו המשווה — ושואל אם הקטבים נושאים יותר מכתשים ליחידת שטח מאשר קו המשווה. A.2 חותך אותו בכיוון האחר, לרצועות של קו אורך — פלחים הנמשכים מקוטב לקוטב — ושואל אם צד אחד של הירח נושא יותר מכתשים מצד אחר. A.3 ו-A.4 חוזרים על שתי הספירות האלה לאחר הסרת האגנים הגדולים והימות, המישורים הכהים, וחישוב מחדש של השטח שנותר. ארבע הטבלאות יחד מפרידות בין שני דברים שספירה אחת הייתה מערבבת: הבדל בין הקטבים לקו המשווה, שהוא נושא המאמר הזה, והבדל בין צדי הירח, שהוא דפוס נפרד. A.5 מסכם את ארבעת המבחנים.

A.1 צפיפות מכתשים לפי קו רוחב

השאלה שסעיף זה עונה עליה ישירה: האם יש יותר מכתשים ליחידת שטח ליד הקטבים מאשר ליד קו המשווה? הספירות נעשות על קטלוג Robbins, ומוגבלות למכתשים שקוטנם המותאם 20 ק"מ ומעלה, כך שהספירה שלמה בכל קו רוחב ונקייה ממכתשים משניים; סדרה שנייה משתמשת ב-40 ק"מ ומעלה. קטלוג Robbins (Robbins, 2019) הוא רשימה גלובלית של מכתשי הירח, ולכל מכתש בה מיקום מרכזי וקוטר שהותאם לשפתו. מכתשים קטנים אינם מזוהים באותה מידה בכל מקום: אור השמש הנמוך ליד הקטבים מטיל צללים ארוכים שמסתירים אותם. מכתש של 20 ק"מ ומעלה מזוהה בכל קו רוחב, ולכן הספירה אינה תלויה במקום שבו נעשתה. מכתשים משניים הם המכתשים הקטנים שיוצרים רסיסים שנזרקו ממכתש גדול יותר; הם מופיעים באשכולות ובשרשראות, היו מוסיפים צפיפות מקומית שאינה קשורה לשאלה, וכמעט כולם קטנים מ-20 ק"מ. הסדרה השנייה, של 40 ק"מ ומעלה, בודקת שהדפוס אינו נישא בידי המכתשים הקטנים ביותר שנספרו; חלק D מראה שהעודף הקוטבי למעשה גדל עם גודל המכתש (D.2).

שום אזור אינו מוסתר במסכה: הימות הם חלק מפני השטח, וכפי שמאמר B.8§ 11 טוען, הם חלק מן הניבוי. לכן הספירה הראשונה הזאת היא פני השטח כפי שהם, בלי שום בחירה שלנו מה להשמיט; ההשפעה של הסרת האגנים והימות מוצגת בנפרד ב-A.3.

הירח מחולק לשתיים-עשרה רצועות של 15° קו רוחב; שטחה של כל רצועה הוא $2\pi R^2 (\sin \phi_2 - \sin \phi_1)$, עם $R = 1737.4$ ק"מ. כאן R הוא הרדיוס הממוצע של הירח, ו- ϕ_1 ו- ϕ_2 הם קווי הרוחב של שני שולי הרצועה. הנוסחה אומרת ששטחה של רצועה על כדור אינו נקבע ברוחבה במעלות אלא במידה שבה היא נמשכת לאורך ציר הקטבים, וזה מה ש- $R (\sin \phi_2 - \sin \phi_1)$ מודד: לרצועה יש אותו שטח כמו לתווית של פחית באותו רדיוס ובאותו גובה. ליד קו המשווה, רצועה של 15° גבוהה לאורך הציר; ליד הקוטב פני השטח מתעקלים, אותן 15° מכסות רק קטע קצר של הציר, וגם היקף הטבעת קצר. לכן לרצועות ברוחב שווה בקו רוחב יש שטחים שונים מאוד: לרצועה 0° – 15° צפון יש 4.909 מיליון קמ"ר, ולרצועה 75° – 90° צפון רק 0.646 מיליון קמ"ר, כשביעית. שתיים-עשרה השטחים יחד מרכיבים את כל פני השטח, $4\pi R^2$.

זו הסיבה שההשוואה נעשית לפי צפיפות ולא לפי מספר. רצועה קוטבית מחזיקה מעט מכתשים פשוט משום שהיא קטנה: ברצועה 75° – 90° דרום יש 139 מכתשים לעומת 873 ברצועה 0° – 15° דרום, ובכל זאת ליחידת שטח היא הצפופה מבין השתיים. חלוקת כל ספירה בשטח הרצועה שלה מסלקת את השפעת הגודל ומשאירה רק את מידת הצפיפות שבה המכתשים עומדים.

עמודות הצפיפות והיחס צבועות: צהוב רך לצפיפות נמוכה, אדום רך לצפיפות גבוהה. לכל קבוצת קטרים סולם משלה, לפי טווח הצפיפויות שלה. לצבעים אין משמעות סטטיסטית. הם נועדו לאפשר לעין לעקוב אחר הצפיפות משורה לשורה, מן הקוטב הדרומי בראש הטבלה אל הקוטב הצפוני בתחתיתה.



סרגל הצבעים: משמאל "low density" — צפיפות נמוכה (צהוב רך); מימין "high density" — צפיפות גבוהה (אדום רך).

הכדור הקטן בעמודה הראשונה של כל שורה מראה את הרצועה שהשורה מתארת, צבועה על כדור הנראה מעט מעל קו המשווה. (בגרסה זו הכדור מסומן בסמל $\bullet$.)

רצועה	אזור	רצועת רוחב	שטח, 10^6 קמ"ר	מכתשים ≥ 20 ק"מ	צפיפות ל- 10^6 קמ"ר	יחס לקו המשווה	מכתשים ≥ 40 ק"מ	צפיפות ל- 10^6 קמ"ר	יחס לקו המשווה
$\bullet$	דרום — הרצועה הצמודה לקוטב	90°–75° דרום	0.646	139	215	1.29	53	82	1.54
$\bullet$	דרום — החלק החיצוני של כיפת הקוטב	75°–60° דרום	1.895	397	210	1.26	132	70	1.31
$\bullet$	דרום — הרצועה הסמוכה לכיפת הקוטב	60°–45° דרום	3.014	693	230	1.38	230	76	1.44
$\bullet$	דרום — קווי רוחב בינוניים	45°–30° דרום	3.928	806	205	1.23	272	69	1.30
$\bullet$	דרום — קווי רוחב נמוכים	30°–15° דרום	4.574	817	179	1.07	287	63	1.18
$\bullet$	קו המשווה — החצי הדרומי של רצועת המשווה	15°–0° דרום	4.909	873	178	1.07	283	58	1.08
$\bullet$	קו המשווה — החצי הצפוני של רצועת המשווה	15°–0° צפון	4.909	761	155	0.93	239	49	0.92
$\bullet$	צפון — קווי רוחב נמוכים	30°–15° צפון	4.574	693	151	0.91	233	51	0.96
$\bullet$	צפון — קווי רוחב בינוניים	45°–30° צפון	3.928	692	176	1.06	207	53	0.99

צפון — הרצועה הסמוכה לכיפת הקוטב	60°–45 צפון	3.014	525	174	1.05	171	57	1.07
צפון — החלק החיצוני של כיפת הקוטב	75°–60 צפון	1.895	383	202	1.21	157	83	1.56
צפון — הרצועה הצמודה לקוטב	90°–75 צפון	0.646	194	300	1.80	65	101	1.89

טבלה: צפיפות מכתשים לפי קו רוחב, בשתיים-עשרה רצועות של 15°, בלי מסכה (A.1).

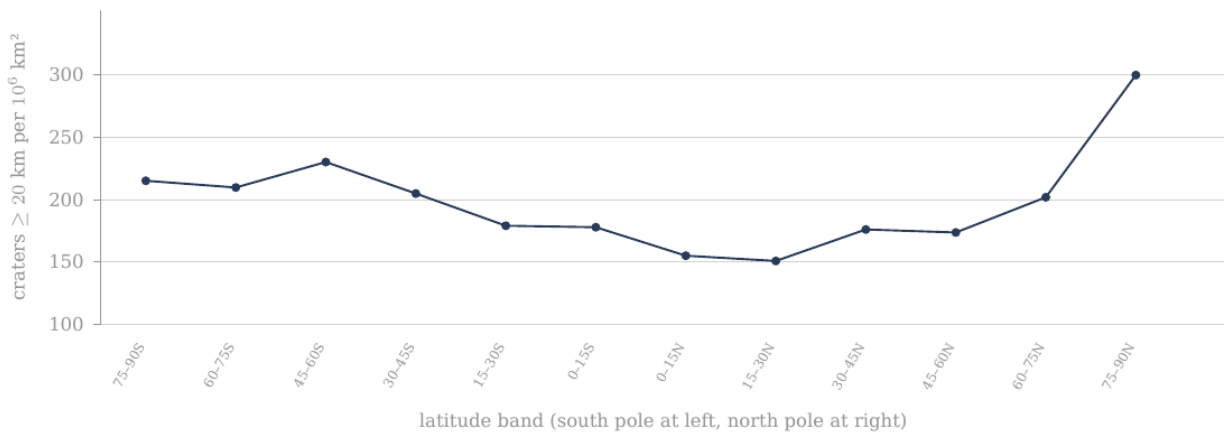
כל שורה מתארת רצועה המקיפה את הירח דרך כל קווי האורך. שתי השורות הראשונות מרכיבות את כיפת הקוטב הדרומית, שתי האחרונות את הצפונית. במפות, קווי רוחב דרומיים עשויים להופיע כמספרים שליליים.

מספר המכתשים הוא הספירה בפועל בכל רצועה. הצפיפות היא המספר הזה מחולק בשטח הרצועה במיליוני קמ"ר. לדוגמה, ברצועה 75°–90 צפון נספרו 194 מכתשים של 20 ק"מ לפחות על שטח של כ-0.646 מיליון קמ"ר; צפיפותם היא אפוא כ-300 למיליון קמ"ר. השטחים מוצגים מעוגלים.

הנתונים וסדרם נשמרו מן הטבלה שסופקה. הסולם עבור 20 ≥ ק"מ: 151–300; עבור 40 ≥ ק"מ: 49–101 מכתשים למיליון קמ"ר. אותו צבע בשתי העמודות מסמן אותו מיקום יחסי על הסולם, ולא בהכרח אותה צפיפות.

נקודת הייחוס: 1 = הצפיפות של רצועת המשווה המלאה, 15° דרום–15° צפון. בקבוצת 20 ≥ ק"מ צפיפות הייחוס היא 166.436 למיליון קמ"ר; בקבוצת 40 ≥ ק"מ היא 53.170. הייחוס מצרף את שתי שורות המשווה בטבלה: 873 ו-761 מכתשים של 20 ≥ ק"מ על שני שטחים של 4.909 מיליון קמ"ר כל אחד. יחס של 1.40 פירושו צפיפות הגבוהה ב-40% מזו של קו המשווה. כל יחס מחושב מן הספירות והשטחים הלא-מעוגלים. שני חצאי רצועת המשווה אינם בהכרח 1 כל אחד לחוד: החצי הדרומי עומד על 1.07 והחצי הצפוני על 0.93, ורק שניהם יחד נותנים 1.

מה הטבלה מראה. קראו את הצבעים לאורך עמודת הצפיפות. שני קצות הטבלה הם האדומים ביותר: הרצועה הצמודה לקוטב הצפוני מגיעה לכ-300 למיליון קמ"ר, פי 1.80 מקו המשווה, והרצועה הצמודה לקוטב הדרומי ל-215, פי 1.29. השורות החיוורות ביותר נמצאות מעט צפונה לקו המשווה, ב-0°–15 צפון וב-15°–30 צפון, עם 155 ו-151. בקבוצת 40 ≥ ק"מ אותם שני קצוות בולטים עוד יותר, 1.89 בצפון ו-1.54 בדרום. העלייה מקו המשווה אל הקוטב אינה חלקה: חצי הכדור הדרומי נושא צפיפויות גבוהות מן הצפוני בקווי הרוחב הבינוניים (230 ב-45°–60 דרום לעומת 174 ב-45°–60 צפון), והפרופיל עולה ויורד בין הקצוות. התוצאה שנלקחת הלאה היא הצרה יותר: הרצועות הסמוכות לשני הקטבים נושאות צפיפויות שהרצועות שביניהן אינן מגיעות אליהן. חלק מן הערך הנמוך בקו המשווה בא מן הימות, הנושאים מעט מכתשים; A.3 מסיר אותם ומראה מה נשאר.



איור 1. צפיפות מכתשים לפי קו רוחב, מכתשים של 20 ק"מ ומעלה, בשתיים-עשרה רצועות של 15° (A.1); הקטלוג כולו, בלי מסכה. שני הקטבים עומדים הכי גבוה. (בשרטוט: ציר אנכי — מכתשים ≥ 20 ק"מ ל- 10^6 קמ"ר, 300–100; ציר אופקי — רצועת רוחב, הקוטב הדרומי משמאל והקוטב הצפוני מימין, מ-75S–90S עד 75N–90N; הקו הכחול-כהה — הצפיפות בכל רצועה.)

האיור משרטט את עמודת הצפיפות של קבוצת ≥ 20 ק"מ כקו אחד, כשהקוטב הדרומי משמאל והקוטב הצפוני מימין; כל נקודה היא רצועה אחת. הקו נמוך באמצע, בקו המשווה, ופונה מעלה בשני הקצוות; הקצה הימני, הרצועה הצמודה לקוטב הצפוני, הוא הנקודה הגבוהה ביותר בפרופיל.

A.2 צפיפות מכתשים לפי קו אורך, בלי מסכה

A.1 מצא שהקטבים צפופים יותר מקו המשווה. לפני שתוצאה זו נקראת כתכונה של קו הרוחב, צריך לדעת אם הירח אינו אחיד גם בכיוון האחר, לאורך היקפו. אילו צד אחד של הירח היה עשיר במכתשים הרבה יותר מצד אחר, הבדל בין צדדים היה עלול להתערבב בהבדל בין הקטבים לקו המשווה. סעיף זה מודד את ההתפלגות לאורך ההיקף כשלעצמה.

לאחר צפיפות המכתשים לפי קו רוחב ב-A.1 נבדקה ההתפלגות לפי קו אורך. החלוקה מאפשרת להבחין בין הבדלים מצפון לדרום לבין הבדלים בין אזורים לאורך היקף הירח.

הספירה מבוססת על קטלוג (Robbins, 2019), לפי הקוטר הנוכחי בשדה DIAM_CIRC_IMG ולפי מיקום מרכז המכתש. DIAM_CIRC_IMG הוא קוטר המעגל שהותאם לשפת המכתש בתמונות. מכתשים של 20 ק"מ ומעלה ושל 40 ק"מ ומעלה נכללו בנפרד. לא הוצאו ימות ולא אגנים.

פני הירח חולקו לשתיים-עשרה רצועות קו אורך ברוחב 30°. כל רצועה נמשכת מקוטב לקוטב וכוללת את כל קווי הרוחב, כמו פלח אחד של תפוז קלוף. כל הרצועות שוות בשטחן: בשונה מרצועות הרוחב, לכל פלח אותה צורה, ולכן אין צורך בתיקון לגודל ביניהן, ואפשר להשוות ישירות את הספירות עצמן. הרצועה 15°–345° מזרח חוצה את קו האורך 0° ומכילה את הנקודה התת-ארצית, הנקודה בצד הקרוב הנמצאת ישירות מתחת לכדור הארץ; הירח שומר פן זה מופנה אל כדור הארץ. שטחה של כל רצועה הוא $A = 4\pi R^2/12$ עם $R = 1737.4$ ק"מ — כ-3.161 מיליון קמ"ר, אחת חלקי שתיים-עשרה מכל פני השטח. הצפיפות חושבה כמספר המכתשים מחולק בשטח הרצועה במיליוני קמ"ר.

נקודת הייחוס: 1 = הצפיפות של רצועת המשווה המלאה, 15° דרום–15° צפון, בלי מסכה. צפיפות הייחוס היא 166.436 למיליון קמ"ר בקבוצת ≥ 20 ק"מ ו-53.170 בקבוצת ≥ 40 ק"מ. יחס של 1.40 מסמן צפיפות הגבוהה ב-40% מן הייחוס הזה. אותו ייחוס נשמר לאורך A.1–A.4, כך שכל יחס בארבע הטבלאות נמדד מול בסיס קבוע אחד.

רק עמודות הצפיפות והיחס צבועות, צהוב רך לערכים הנמוכים ואדום רך לגבוהים. לכל קבוצת קטרים סולם צבעים משלה בתוך הטבלה. לצבעים אין משמעות סטטיסטית; להשוואה בין טבלאות, קראו את המספרים.



סרגל הצבעים: משמאל "low density" — צפיפות נמוכה (צהוב רך); מימין "high density" — צפיפות גבוהה (אדום רך).

רצועה	אזור	רצועת אורך, ° מזרח	שטח, 10^6 קמ"ר	מכתשים ≥ 20 ק"מ	צפיפות ל- 10^6 קמ"ר	יחס לקו המשווה	מכתשים ≥ 40 ק"מ	צפיפות ל- 10^6 קמ"ר	יחס לקו המשווה
•	סביב קו האורך של הנקודה התת-ארצית	345–15	3.161	479	152	0.91	168	53	1.00
•	הצד הקרוב — מזרחית לנקודה התת-ארצית	15–45	3.161	505	160	0.96	135	43	0.80
•	הצד הקרוב — לעבר קו האורך המאסף	45–75	3.161	611	193	1.16	170	54	1.01
•	סביב קו האורך המאסף	75–105	3.161	750	237	1.43	269	85	1.60
•	הצד הרחוק — מעבר לקו האורך המאסף	105–135	3.161	793	251	1.51	285	90	1.70
•	הצד הרחוק — לעבר הנקודה הנגדית לכדור הארץ	135–165	3.161	667	211	1.27	245	78	1.46
•	סביב קו האורך של הנקודה הנגדית לכדור הארץ	165–195	3.161	711	225	1.35	233	74	1.39
•	הצד הרחוק — מעבר לנקודה הנגדית לכדור הארץ	195–225	3.161	736	233	1.40	239	76	1.42
•	הצד הרחוק — לעבר קו האורך המוביל	225–255	3.161	643	203	1.22	205	65	1.22

1.01	54	170	0.93	154	487	3.161	255–285	סביב קו האורך המוביל	•
0.66	35	111	0.62	102	324	3.161	285–315	הצד הקרוב — מעבר לקו האורך המוביל	•
0.59	31	99	0.51	84	267	3.161	315–345	הצד הקרוב — מערבית לנקודה התת-ארצית	•

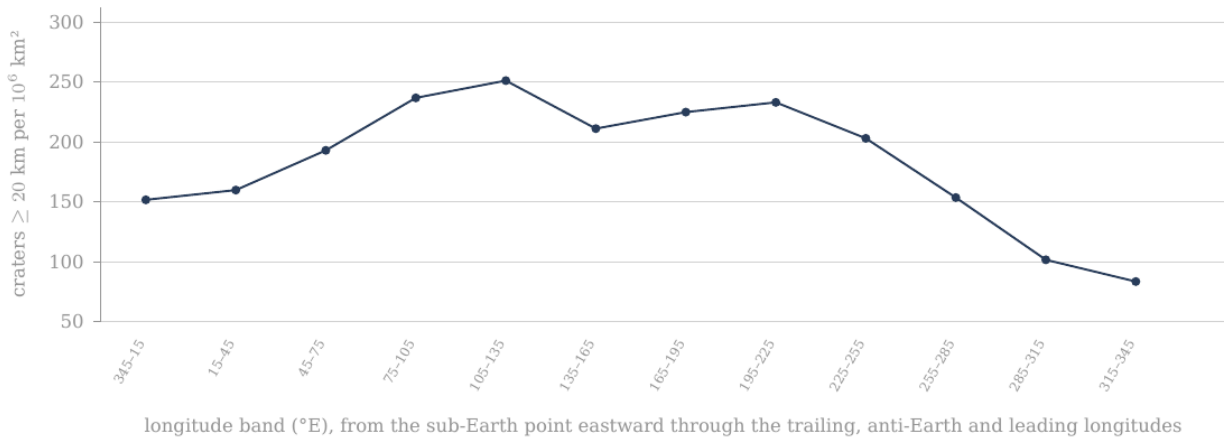
טבלה: צפיפות מכתשים לפי קו אורך, בשתיים-עשרה רצועות של 30° , בלי מסכה (A.2).

כיצד לקרוא את הטבלה: ברצועה 75° – 105° מזרח נספרו 750 מכתשים של $20 \geq$ ק"מ. חלוקתם בשטח הרצועה נותנת כ-237 למיליון קמ"ר. היחס לקו המשווה הוא כ-1.43, כלומר צפיפות הגבוהה בכ-43% מזו של קו המשווה בלי מסכה. זו רצועה מקוטב לקוטב, ולא כיפה סביב הנקודה המאספת. בסמל הכדור הירח נראה ממעל לקוטב הצפוני: הקשת שמימין היא כדור הארץ, כך שהנקודה התת-ארצית פונה ימינה, והחץ הוא כיוון התנועה במסלול; קו האורך המאסף (90° מזרח) נמצא למעלה וקו האורך המוביל (90° מערב) למטה. הגזרה הצבועה בכל סמל היא הרצועה של אותה שורה.

הצפיפות הגדולה ביותר היא ברצועה 105° – 135° מזרח, והקטנה ביותר ברצועה 315° – 345° מזרח. היחס בין השיא למינימום הוא $2.97 \approx 793/267$ בקבוצת $20 \geq$ ק"מ ו- $2.88 \approx 285/99$ בקבוצת $40 \geq$ ק"מ. משום שלכל הרצועות אותו שטח, היחס בין הצפיפויות שווה ליחס בין הספירות. היחסים חושבו מן הספירות, ולא מן הצפיפויות המעוגלות.

מה הטבלה מראה. הירח רחוק מלהיות אחיד לאורך היקפו. הצד הרחוק והרצועות שסביב קו האורך המאסף אדומות, פי 1.22 עד 1.51 מקו המשווה בקבוצת $20 \geq$ ק"מ; הצד הקרוב שממערב לנקודה התת-ארצית חיוור, עד 0.51 ברצועה 315° – 345° מזרח. ברצועה זו נמצאים Mare Imbrium — במודל הפתח העיקרי שדרכו נכנס לירח החומר והחום מכדור הארץ; הוא לא פלט חומר — וחלק גדול מן הימות ומישורי הבזלת המערביים; קרקעיותיהם צעירות ונושאות מעט מכתשים. ההבדל בין הרצועה העשירה ביותר לענייה ביותר, כמעט פי שלושה, גדול מן ההבדל בין הקטבים לקו המשווה ב-A.1. לכן זהו דפוס בפני עצמו, ויש להפריד אותו מן השאלה הקוטבית.

ההתפלגות לפי קו אורך מוצגת לצד ההתפלגות לפי קו רוחב. "מוביל" ו"מאסף" משמשים כאן במובן המסלולי המקובל: הנקודה המובילה, קדקוד התנועה של הירח במסלולו, היא (0° , 90° מערב), והנקודה המאספת היא (0° , 90° מזרח). הנקודה המובילה היא הנקודה על קו המשווה הפונה קדימה לאורך המסלול, כפי שחזית מכונית פונה אל הכביש; הנקודה המאספת היא זו שפונה אחורה. עודף המכתשים נמצא בצד המאסף; המודל קורא אותו דרך הימות, הנרחבים יותר באותו צד (A.9).



איור 2. צפיפות מכתשים לפי קו אורך, מכתשים של 20 ק"מ ומעלה, בשתי-עשרה רצועות של 30° (A.2); הקטלוג כולו, בלי מסכה. השיא נמצא מעט מזרחה לקו האורך המאסף, והמינימום מעט מערבה לנקודה התת-ארצית. (בשרטוט: ציר אנכי — מכתשים ≥ 20 ק"מ ל- 10^6 קמ"ר, 50–300; ציר אופקי — רצועת אורך ($^\circ$ מזרח), מן הנקודה התת-ארצית מזרחה דרך קו האורך המאסף, הנקודה הנגדית לכדור הארץ וקו האורך המוביל, מ-345–15 עד 315–345; הקו הכחול-כהה — הצפיפות בכל רצועה.)

האיור משרטט את הצפיפות של קבוצת $20 \leq$ ק"מ סביב הירח, החל מן הנקודה התת-ארצית ובתנועה מזרחה. הקו מטפס לאורך קו האורך המאסף אל שיאו מעט מעבר לו, נשאר גבוה לאורך הצד הרחוק, ויורד בתלילות מעל קו האורך המוביל אל ערכיו הנמוכים ביותר בצד הקרוב המערבי.

הספירות והצפיפויות הועתקו מן הנתונים שסופקו. השטח והיחסים חושבו מן הגאומטריה הכדורית ומן הספירות. אין כאן ספירה חוזרת של הקטלוג. הספים של 20 ו-40 ק"מ מתייחסים לקוטר הנוכחי, שבמודל הוא גם הקוטר המקורי (C.7, D.2).

A.3 צפיפות מכתשים לפי קו רוחב לאחר הוצאת האגנים והימות

A.1 ו-A.2 ספרו את פני השטח כולם. על פני שטח אלה יש שני סוגי אזורים שתיעוד המכתשים שלהם עוצב בידי משהו אחר מקו הרוחב, וסעיף זה מסיר אותם כדי לראות כיצד נראה פרופיל קו הרוחב בלעדיהם.

הסוג הראשון הוא הרצפות הכהות של מסכת הימות של LROC: הימות ומישורי הבזלת. קרקעית של ים צעירה מפני השטח שסביבה: במודל ים הוא פתח מעל כיפת הזנה (מאמר 5), והמכתשים שעמדו שם לפני שנפתח הותכו. מישור בזלת (Procellarum, Tranquillitatis, Fecunditatis, Insularum, Frigoris) אינו ים: הוא קרום שהותך בחום הכללי של כדור הארץ, ואין מתחתיו כיפת הזנה. בשני המקרים הרצפה ענייה במכתשים משום שהתיעוד שלה אופס, ולא משום שנחתו בה פחות מכתשים. הימות והמישורים שוכנים בעיקר בצד הקרוב ובקווי רוחב נמוכים, ולכן הם מורידים במיוחד את הצפיפות של רצועות המשווה. הסוג השני הוא האגנים הגדולים, אלה של 500 ק"מ ומעלה. אגן יחיד בגודל כזה הוא מבנה אחד שיכול לכסות חלק גדול של רצועה ליד הקוטב, ולקרקעיתו ולשפתו יש היסטוריה משלה; בתוך רצועה הוא יכול להעלות או להוריד את הספירה בעצמו. הסרת שניהם משאירה את החלק של פני השטח שתיעוד המכתשים שלו אחיד ביותר בהיסטוריה שלו, והצפיפות על החלק הזה היא המדד הטוב יותר לאופן שבו המכתשים התפזרו.

עמודות הצפיפות, היחס לייחוס ושינוי הצפיפות צבועות: צהוב רך לערכים הנמוכים ואדום רך לגבוהים. לקבוצת $20 \leq$ ק"מ ולקבוצת $40 \leq$ ק"מ סולמות נפרדים לפי טווח ערכיהן. הצבעים הם עזר לקריאה בלבד, ואין להם משמעות סטטיסטית.

low density

high density

סרגל הצבעים: משמאל "low density" — צפיפות נמוכה (צהוב רך); מימין "high density" — צפיפות גבוהה (אדום רך).

מה שונה מ-A.1: A.1: מציג את כל שטחה של כל רצועת רוחב, בלי מסכה. A.3 משתמש באותן שתי-עשרה רצועות, אבל לאחר הוצאת 20 האגנים שקוטרם ≥ 500 ק"מ ומצולעי הימות. המסכה היא קבוצת האזורים שהוצאו מן הספירה; היא מתוארת בתיבה שמתחת לטבלה. מכתש שמרכזו נמצא בתוך המסכה אינו נספר, והשטח שהמסכה מכסה מופחת משטח הרצועה. הצפיפות כאן היא אפוא מספר המכתשים שנותרו מחולק בשטח שנותר בפועל. שני חלקי השבר מוקטנים יחד, כך שהצפיפות נמדדת על אותה קרקע במונה ובמכנה.

כל שורה עדיין מתארת רצועה המקיפה את הירח דרך כל קווי האורך. שתי השורות הראשונות מרכיבות את כיפת הקוטב הדרומית, 60° – 90° דרום, ושתי האחרונות את כיפת הקוטב הצפונית, 60° – 90° צפון. הרצועה 75° – 90° היא רק החלק הצמוד לקוטב, ולא הכיפה כולה.

מספר המכתשים הוא הספירה בפועל מחוץ למסכה בכל רצועה. הצפיפות היא המספר הזה מחולק בשטח הרצועה שנותר לאחר הוצאת האגנים והימות, במיליוני קמ"ר. לדוגמה, ברצועה 75° – 90° דרום נותרו 84 מכתשים של ≥ 20 ק"מ על שטח של כ-0.275 מיליון קמ"ר; הצפיפות הנתונה היא אפוא כ-305 למיליון קמ"ר. לפני המסכה היו באותה רצועה 139 מכתשים וצפיפות של כ-215 למיליון קמ"ר. הירידה במספר המכתשים לצד העלייה בצפיפות נובעת מכך שהמסכה הסירה יחסית יותר שטח ממכתשים.

נקודת הייחוס נשארת זו של A.1: הצפיפות של רצועת המשווה המלאה 15° דרום– 15° צפון **בלי מסכה**. בקבוצת ≥ 20 ק"מ צפיפות הייחוס היא 166.435637277 למיליון קמ"ר; בקבוצת ≥ 40 ק"מ היא 53.169769069. יחס של 1.40 פירושו אפוא צפיפות הגבוהה ב-40% מן הבסיס הקבוע הזה. אין להחליף את המכנה בקו המשווה שלאחר המסכה. הבסיס הקבוע שומר את עמודת היחס של A.3 ניתנת להשוואה ישירה לזו של A.1, כך שהקורא רואה כיצד זזה כל רצועה.

אולם הבסיס הקבוע הזה מגזים בעודף הקוטבי לאחר המסכה, ואת הסיבה יש לומר בפשטות. עמודת היחס מחלקת רצועה ממוסכת בקו משווה לא ממוסך: המונה איבד את ימותיו, המכנה שמר עליהם. המסכה מסירה את הימות העניים במכתשים גם מרצועת המשווה, ומול רצועת המשווה לאחר אותה מסכה (1,216 מכתשים על 5.856 מיליון קמ"ר, 207.7 למיליון קמ"ר) שתי כיפות הקוטב (882 מכתשים על 3.706 מיליון קמ"ר, 238.0) עומדות על 1.15, ולא על 1.40–1.48. השוואה הוגנת מפעילה את אותה מסכה בשני הצדדים. הספירה השווה-מול-שווה המשמשת למבחן של המאמר היא הספירה הנקייה של A.11 ו-D.1, שבה הימות ו-South Pole Aitken מוסרים בשני הצדדים, מכיפות הקוטב ומרצועת המשווה כאחד; היא נותנת 1.20 ± 0.05 .

עמודת שינוי הצפיפות עונה על שאלה אחרת מעמודת היחס. היא משווה כל רצועה לעצמה לפני המסכה ואחריה: $\Delta\rho = \left(\rho_{\text{after}}/\rho_{\text{before}} - 1 \right) \times 100\%$. כאן ρ_{before} היא צפיפות הרצועה ב-A.1, ו- ρ_{after} צפיפותה על השטח שנותר. ערך חיובי פירושו שהצפיפות על השטח שנותר גבוהה מצפיפות אותה רצועה לפני המסכה, כלומר החלק שהוסר היה עני במכתשים משאר הרצועה; ערך שלילי פירושו שהיא נמוכה יותר, כלומר החלק שהוסר היה עשיר יותר. זה אינו יחס לקו המשווה.

רצועה	אזור	רצועה	שטח שנותר, 10^6 קמ"ר	$N \geq 20$	צפיפות ≥ 20	יחס ≥ 20	שינוי ≥ 20	$N \geq 40$	צפיפות ≥ 40	יחס ≥ 40	שינוי ≥ 40
-------	------	-------	------------------------	-------------	------------------	---------------	-----------------	-------------	------------------	---------------	-----------------

•	דרום — הרצועה הצמודה לקוטב	90°–75 דרום	0.275	84	305	1.83	+42.0%	34	124	2.32	+50.7%
•	דרום — החלק החיצוני של כיפת הקוטב	75°–60 דרום	1.033	238	230	1.38	+10.0%	71	69	1.29	-1.3%
•	דרום — הרצועה הסמוכה לכיפת הקוטב	60°–45 דרום	1.544	380	246	1.48	+7.1%	109	71	1.33	-7.5%
•	דרום — קווי רוחב בינוניים	45°–30 דרום	2.067	476	230	1.38	+12.2%	150	73	1.37	+4.8%
•	דרום — קווי רוחב נמוכים	30°–15 דרום	2.194	455	207	1.25	+16.1%	156	71	1.34	+13.3%
•	קו המשווה — החצי הדרומי	15°–0 דרום	2.976	634	213	1.28	+19.8%	215	72	1.36	+25.3%
•	קו המשווה — החצי הצפוני	15°–0 צפון	2.880	582	202	1.21	+30.3%	186	65	1.21	+32.6%
•	צפון — קווי רוחב נמוכים	30°–15 צפון	2.153	484	225	1.35	+48.4%	171	79	1.49	+55.9%
•	צפון — קווי רוחב בינוניים	45°–30 צפון	2.411	580	241	1.45	+36.6%	171	71	1.33	+34.6%
•	צפון — הרצועה הסמוכה לכיפת הקוטב	60°–45 צפון	1.639	375	229	1.37	+31.4%	123	75	1.41	+32.3%
•	צפון — החלק החיצוני של כיפת הקוטב	75°–60 צפון	1.752	366	209	1.25	+3.3%	148	84	1.59	+1.9%
•	צפון — הרצועה הצמודה לקוטב	90°–75 צפון	0.646	194	300	1.80	+0.0%	65	101	1.89	+0.0%

טבלה: צפיפות מכתשים לפי קו רוחב לאחר הוצאת האגנים והימות (A.3). היחסים מול הבסיס הקבוע של A.1; השינוי — כל רצועה מול עצמה לפני המסכה.

כיצד לקרוא את הטבלה: בכל רצועה קראו קודם את השטח שנותר לאחר המסכה, אחר כך את שלושת הערכים של ≥ 20 ק"מ — מספר, צפיפות ויחס — ואת שינוי הצפיפות ביחס לאותה רצועה לפני המסכה.

אחריהם באים אותם ארבעה ערכים עבור $40 \geq \text{ק"מ}$. כך אפשר להשוות גם בין מקומות על הירח וגם בין שתי קבוצות הקטרים, בלי לשנות את בסיס הייחוס.

שתי שורות מראות את שני הקצוות של עמודת השינוי. הרצועה 75° – 90° צפון אינה נוגעת במסכה כלל: שטחה נשאר 0.646 מיליון קמ"ר, כל 194 מכתשיה נשארים, והשינוי שלה הוא $+0.0\%$. הרצועה 15° – 30° צפון מאבדת יותר ממחצית שטחה, מ-4.574 ל-2.153 מיליון קמ"ר, משום שהיא מחזיקה נתח גדול מימות הצד הקרוב; הצפיפות שלה על מה שנותר עולה ב-48.4%, העלייה הגדולה ביותר בטבלה (ב- $40 \geq \text{ק"מ}$ אותה רצועה עולה ב-55.9%, שוב הגדולה ביותר).

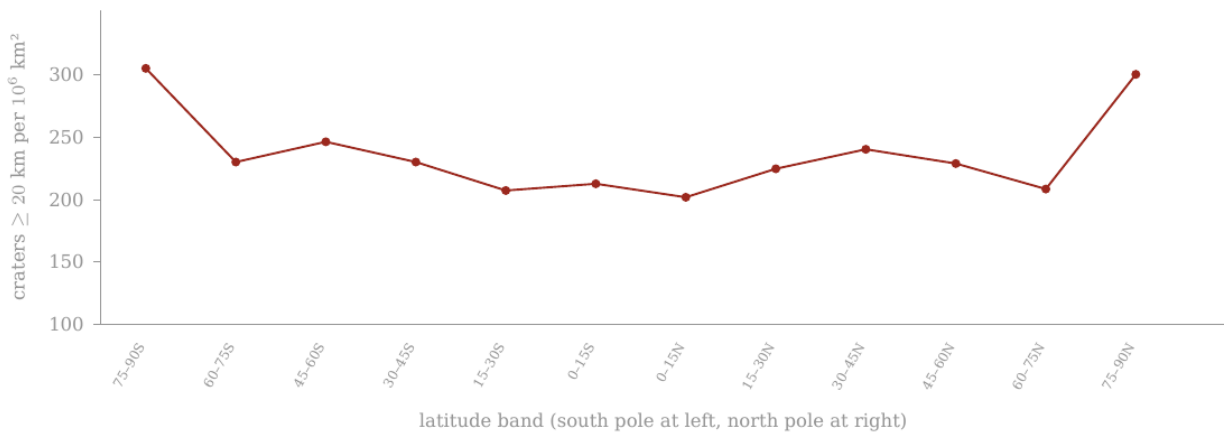
מה הטבלה מראה. המסכה מעלה את קווי הרוחב הנמוכים והבינוניים, ובעיקר בצפון, שם שוכנים ימות הצד הקרוב; הרצועה הצמודה לקוטב הצפוני, שאין בה מסכה, נשארת במקומה. ובכל זאת שתי הרצועות הצמודות לקטבים נשארות האדומות ביותר בקבוצת $20 \geq \text{ק"מ}$: 305 למיליון קמ"ר בדרום ו-300 בצפון, לעומת 202 עד 246 בעשר הרצועות שביניהן. בקבוצת $40 \geq \text{ק"מ}$ הרצועה הקוטבית הדרומית עומדת הכי גבוה מכולן, על 2.32. העודף הקוטבי אינו נוצר אפוא מכך שהימות מורידים את קו המשווה: הוא נשאר על הקרקע שהמסכה משאירה, אם כי קטן יותר ממה שהבסיס הקבוע מרמז, כפי שההשוואה השווה-מול-שווה שלמעלה מראה.

המסכה

המסכה היא האיחוד של 20 האגנים שקוטר השפה העיקרית או החיצונית שלהם 500 ק"מ ומעלה בטבלה 1 של (Neumann et al. 2015), ושל מצולעי הימות של LROC_GLOBAL_MARE_180. כל אגן מיוצג ככיפה כדורית שמרכזה בקואורדינטות שפורסמו, ברדיוס זוויתי $D/(2R_{\text{Moon}})$; מכתש מוסר כאשר מרכזו נמצא בתוך אגן אחד לפחות או בתוך מצולע ים, וחפיפות מוסרות פעם אחת בלבד. השטח שנותר מחושב על רשת גלובלית של נקודות אמצע של $0.05^\circ \times 0.05^\circ$, עם שטחי תאים כדוריים מדויקים; השייכות לאגן מחושבת ישירות ממרחק המעגל הגדול, ולא ממצולע של שפת האגן. אותה מסכה ואותו חישוב שטח משמשים ב-A.3, ב-A.4 וב-A.7.

התיבה מציגה את המסכה במלואה, כדי שאפשר יהיה לחזור על הספירה. כל אגן משורטט כמעגל על הכדור, שהרדיוס הזוויתי שלו — הזווית במרכז הירח ממרכז האגן אל שולו — הוא מחצית הקוטר שלו מחולקת ברדיוס הירח. השטח שנותר נמצא על ידי כיסוי הירח בתאים קטנים של 0.05° על 0.05° , שמירת אלה שמרכזם מחוץ למסכה, וחיבור שטחיהם המדויקים; תא הנמצא בתוך שני אגנים, או בתוך אגן ובתוך ים, מוסר פעם אחת.

כל הערכים שלאחר המסכה באים מהרצה אחת של המסכה המתוארת למעלה. השטחים המוצגים מעוגלים; הצפיפויות, היחסים והשינויים מחושבים מן הערכים הלא-מעוגלים. אין להסיק משמעות סטטיסטית מן הצבעים. יש להבחין בין הרצועות 75° – 90° לבין הכיפות 60° – 90° .



איור 3. אותן שתיים-עשרה רצועות, לאחר הוצאת עשרים האגנים של 500 ק"מ ומעלה והימות והפחתת שטחם (A.3). המסכה מרימה את קו המשווה ומשאירה את הקטבים. (בשרטוט: ציר אנכי — מכתשים ≥ 20 ק"מ ל- 10^6 קמ"ר, 300–100; ציר אופקי — רצועת רוחב, הקוטב הדרומי משמאל והקוטב הצפוני מימין; הקו האדום — הפרופיל הממוסך.)

הקו האדום הוא הפרופיל הממוסך, משורטט באותו סולם כמו איור 1. בהשוואה לאיור 1, אמצע הקו עלה בעוד שני הקצוות נשארו גבוהים: הקצה של הקוטב הדרומי עלה לערך לגובה הקצה של הקוטב הצפוני, ושני הקטבים נשארים הנקודות הגבוהות ביותר.

A.4 צפיפות מכתשים לפי קו אורך לאחר הוצאת האגנים והימות

סעיף זה מפעיל את אותה מסכה על רצועות קו האורך של A.2. מטרתו לראות כמה מן ההבדל הגדול בין מזרח למערב שנמצא שם שייך לימות ולאגנים עצמם.

עמודות הצפיפות, היחס לייחוס ושינוי הצפיפות צבועות: צהוב רך לערכים הנמוכים ואדום רך לגבוהים. לקבוצת $20 \leq$ ק"מ ולקבוצת $40 \geq$ ק"מ סולמות נפרדים לפי טווח ערכיהן. הצבעים הם עזר לקריאה בלבד, ואין להם משמעות סטטיסטית.

low density high density

סרגל הצבעים: משמאל "low density" — צפיפות נמוכה (צהוב רך); מימין "high density" — צפיפות גבוהה (אדום רך).

מה שונה מ-A.2: A.2: מציג את אותן שתיים-עשרה רצועות קו אורך בלי מסכה. כאן הוצאו 20 האגנים של Neumann שקוטרם ≥ 500 ק"מ ומצולעי הימות של LROC. מכתש שמרכזו נמצא בתוך המסכה אינו נספר, והשטח שהמסכה מכסה מופחת משטח הרצועה.

כל שורה מתארת רצועה ברוחב 30° הנמשכת מקוטב לקוטב. 15° – 345° מזרח חוצה את 0° ומכילה את הנקודה התת-ארצית; 105° – 75° מזרח מקיפה את קו האורך המאסף; 195° – 165° מזרח את הנקודה הנגדית לכדור הארץ; ו- 285° – 255° מזרח את קו האורך המוביל.

מספר המכתשים הוא הספירה בפועל מחוץ למסכה. הצפיפות היא מספר המכתשים שנותרו מחולק בשטח שנותר לאחר המסכה, במיליוני קמ"ר. בשונה מ-A.2, לאחר המסכה הרצועות כבר אינן שוות בשטחן: רצועה שהחזיקה הרבה ים או אגן שומרת פחות שטח מרצועה שהחזיקה מעט, והשטחים שנותרו נעים בין 1.073 ל-2.729 מיליון קמ"ר. שוב, הצפיפות, ולא המספר, היא המדד שיש להשוות.

נקודת הייחוס נשארת זו של 1: A.1-A.3 = הצפיפות של רצועת המשווה המלאה 15° דרום-15° צפון בלי מסכה. ≥ 20 : 166.435637277 למיליון קמ"ר; ≥ 40 : 53.169769069 יחס של 1.40 פירושו צפיפות הגבוהה ב-40% מן הבסיס הקבוע הזה.

עמודת שינוי הצפיפות משווה כל רצועה לעצמה לפני המסכה ואחריה: $\Delta\rho = \left(\rho_{\text{after}} / \rho_{\text{before}} - 1 \right) \times 100\%$.
 ערך חיובי הוא עלייה בצפיפות על השטח שנותר; ערך שלילי הוא ירידה. זה אינו היחס לקו המשווה.

שיטת המסכה

אותה מסכה כמו ב-A.3: האגנים של Neumann של 500 ק"מ ומעלה ככיפות כדוריות, באיחוד עם מצולעי LROC_GLOBAL_MARE_180; שטח על רשת של 0.05°×0.05° עם שטחי תאים מדויקים; חפיפות מופחתות פעם אחת; מכתשים משויכים לפי מרכזם. בסיכום על פני שתיים-עשרה הרצועות, A.3 ו-A.4 נותנים אותו שטח שנותר (21.570 מיליון קמ"ר) ואותן ספירות (4,848 ו-1,599).

התיבה מאשרת ששני החיתוכים של פני השטח הממוסכים עקביים: רצועות הרחב ורצועות האורך מחלקות את אותה קרקע שנוותר, מעט יותר ממחצית הירח, בשתי דרכים שונות, ושתיהן מסתכמות באותו שטח ובאותו מספר מכתשים.

רצועה	אזור	רצועת אורך, ° מזרח	שטח שנותר, 10 ⁶ קמ"ר	$N \geq 20$	צפיפות ≥ 20	יחס ≥ 20	שינוי ≥ 20	$N \geq 40$	צפיפות ≥ 40	יחס ≥ 40	שינוי ≥ 40
א	סביב קו האורך של הנקודה התת-ארצית	15–345	1.879	420	224	1.34	+47.5%	149	79	1.49	+49.2%
א	הצד הקרוב — מזרחית לנקודה התת-ארצית	15–45	1.510	351	232	1.40	+45.5%	92	61	1.15	+42.6%
א	הצד הקרוב — לעבר קו האורך המאסף	45–75	1.837	438	238	1.43	+23.3%	121	66	1.24	+22.5%
א	סביב קו האורך המאסף	75–105	1.692	370	219	1.31	-7.8%	131	77	1.46	-9.0%
א	הצד הרחוק — מעבר לקו האורך המאסף	105–135	2.729	725	266	1.60	+5.9%	251	92	1.73	+2.0%

הצד הרחוק — לעבר הנקודה הנגדית לכדור הארץ	135–165	1.995	457	229	1.38	+8.6%	166	83	1.57	+7.4%
סביב קו האורך של הנקודה הנגדית לכדור הארץ	165–195	1.345	356	265	1.59	+17.7%	96	71	1.34	-3.1%
הצד הרחוק — מעבר לנקודה הנגדית לכדור הארץ	195–225	1.904	480	252	1.51	+8.3%	165	87	1.63	+14.6%
הצד הרחוק — לעבר קו האורך המוביל	225–255	1.813	369	204	1.22	+0.1%	121	67	1.26	+2.9%
סביב קו האורך המוביל	255–285	2.044	417	204	1.23	+32.4%	152	74	1.40	+38.3%
הצד הקרוב — מעבר לקו האורך המוביל	285–315	1.748	276	158	0.95	+54.0%	90	51	0.97	+46.6%
הצד הקרוב — מערבית לנקודה התת-ארצית	315–345	1.073	189	176	1.06	+108.5%	65	61	1.14	+93.4%

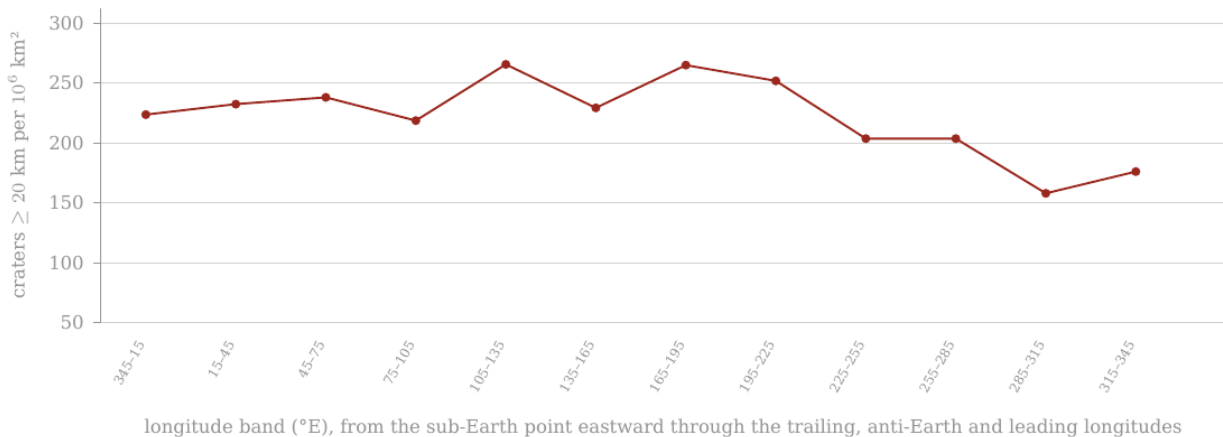
טבלה: צפיפות מכתשים לפי קו אורך לאחר הוצאת האגנים והימות (A.4). היחסים מול הבסיס הקבוע של A.1; השינוי — כל רצועה מול עצמה לפני המסכה.

כיצד לקרוא את הטבלה: בכל רצועה מוצג השטח שנותר, אחר כך N , צפיפות, יחס ושינוי צפיפות עבור ≥ 20 ק"מ; אחריהם אותם ארבעה ערכים עבור ≥ 40 ק"מ. כך נשמר אותו היגיון קריאה של A.1–A.3.

עמודת השינוי מראה היכן המסכה פועלת. העלייה הגדולה ביותר היא ברצועה 315° – 345° מזרח, הרצועה המחזיקה את Mare Imbrium וחלק גדול מן הימות ומישורי הבזלת המערביים: על 1.073 מיליון הקמ"ר שנותרו, הצפיפות עולה ב-108.5%, יותר מכפליים, מ-84 ל-176 למיליון קמ"ר. הרצועה שסביב קו האורך המאסף, 75° – 105° מזרח, היא הרצועה היחידה בקבוצת ≥ 20 ק"מ שצפיפותה יורדת, ב-7.8%: שם החלק שהוסר היה עשיר במכתשים מן החלק שנותר.

השיא והמינימום לאחר המסכה: עבור ≥ 20 המרבי הוא 135–105 והמזערי 315–285, יחס של 1.68. עבור ≥ 40 המרבי הוא 135–105 והמזערי 315–285, יחס של 1.79. אלה תוצאות החישוב, ולא הנחה שהוכנסה מראש.

מה הטבלה מראה. המסכה מצמצמת את ההבדל בין מזרח למערב: היחס בין הרצועה העשירה ביותר לענייה ביותר יורד מ-2.97 ל-1.68 ב- ≥ 20 ק"מ, ומ-2.88 ל-1.79 ב- ≥ 40 ק"מ. חלק גדול מדפוס קו האורך שייך אפוא לאזורים הממוסכים עצמם, ובמיוחד לקרקעיות הימות הצעירות. המסכה אינה מסלקת את הדפוס לגמרי: הצד הרחוק שמעבר לקו האורך המאסף נשאר הרצועה העשירה ביותר בשתי הקבוצות, והצד הקרוב שמעבר לקו האורך המוביל — הענייה ביותר. מה שנשאר מן ההבדל בין מזרח למערב נדון יחד עם ששת הצירים (A.9); לשאלה הקוטבית די בכך שהוא נמדד והופרד.



איור 4. אותן שתי-עשרה רצועות קו אורך, לאחר הוצאת עשרים האגנים של 500 ק"מ ומעלה והימות והפחתת שטחם (A.4). המינימום המערבי עולה; השיא בצד הרחוק נשאר. (בשרטוט: ציר אנכי — מכתשים ≥ 20 ק"מ ל- 10^6 קמ"ר, 300–50; ציר אופקי — רצועת אורך (° מזרח), מן הנקודה התת-ארצית מזרחה דרך קו האורך המאסף, הנקודה הנגדית לכדור הארץ וקו האורך המוביל; הקו האדום — הפרופיל הממוסך.)

בהשוואה לאיור 2, באותו סולם, השקע העמוק בצד הקרוב המערבי התמלא ברובו, והקו כולו נמצא כעת בטווח צר יותר; השיא שמעבר לקו האורך המאסף הוא עדיין הנקודה הגבוהה ביותר. הצבעים אינם מבחן מובהקות. קובץ הביקורת שומר את הערכים המספריים שחושבו.

A.5 סיכום ומסקנות מארבע בדיקות הרצועות

סעיף זה מרכז את מה שמצאו ארבע בדיקות הרצועות, לפני שהמדידה משנה את צורתה. השאלה שהוא עונה עליה פשוטה: האם צפיפות המכתשים הגבוהה ליד הקטבים היא תכונה אמיתית של האזורים הקוטביים, או מראה שנוצר מן האופן שבו חולק הירח לצורך הספירה, או מכמה תצורות גדולות על פניו?

תזכורת קצרה למונחים. **רצועה** היא פס פני השטח שבין שני קווי רוחב (למשל 75°–90° צפון) או בין שני קווי אורך (למשל 105°–135° מזרח). רצועת רוחב מקיפה את הירח כולו; רצועת אורך נמתחת מקוטב לקוטב, כמו פלח של תפוז. בכל רצועה סופרים את המכתשים שמרכזיהם נמצאים בתוכה ומחלקים בשטח הרצועה. התוצאה, **צפיפות המכתשים**, ניתנת לאורך כל המאמר במכתשים למיליון קמ"ר; היא מאפשרת להשוות בהגינות רצועות שגודלן שונה מאוד, שהרי רצועה גדולה מכילה יותר מכתשים רק משום שהיא גדולה יותר.

ארבעת הסעיפים הקודמים בחנו את אותה אוכלוסיית מכתשים באמצעות מערכת פשוטה של ארבע בדיקות משלימות: ההתפלגות לפי קו רוחב ללא מסכה (A.1), ההתפלגות לפי קו אורך ללא מסכה (A.2), ההתפלגות לפי קו רוחב לאחר הוצאת האגנים והימות (A.3), וההתפלגות לפי קו אורך לאחר אותה הוצאה (A.4). הצירוף שלהן

חשוב יותר מכל אחת מן הטבלאות לבדה. שינוי כיוון החיתוך — מקו רוחב לקו אורך — בודק אם אי-האחידות קשורה בעיקר למיקום ביחס לקטבים או למיקום לאורך היקף הירח. החלת אותה מסכה על שני החיתוכים מספקת בקרה נוספת: היא מאפשרת לבחון עד כמה הפרופילים הנצפים תלויים באגנים הגדולים ובמשטחי הימות, ועד כמה הם נשארים בשטח שמחוץ לאזורים אלה.

A.5.1 — שני דפוסים מרחביים נפרדים. התוצאה הראשונה היא שאין פרופיל יחיד שמסביר את התפלגות המכתשים על פני הירח. קו הרוחב וקו האורך חושפים שני דפוסים שונים.

ללא מסכה, פרופיל קו הרוחב מראה צפיפויות גבוהות ברצועות הסמוכות לשני הקטבים. בקבוצת $20 \leq \text{ק"מ}$, למשל, הרצועה 75° – 90° צפון • מגיעה לכ-300 מכתשים למיליון קמ"ר, בעוד המינימום, ברצועה 15° – 30° צפון •, הוא כ-151 למיליון קמ"ר — כמעט פי שניים. קבוצת $40 \leq \text{ק"מ}$ מראה הבדל דומה: כ-101 למיליון קמ"ר ברצועה הצפונית הסמוכה לקוטב לעומת כ-51 למיליון קמ"ר ב- 15° – 30° צפון. אולם הפרופיל בין הרצועות אינו מונוטוני — הוא אינו מטפס בעקביות, רצועה אחת רצועה, מקו המשווה אל הקוטב: יש בו עליות וירידות מקומיות, ולכן לא נכון לתאר את התוצאה כמדרג חלק מקו המשווה אל הקוטב. התוצאה הצרה יותר היא שהקצה הקוטבי של פרופיל קו הרוחב מגיע לצפיפויות שאינן מושגות ברצועות הביניים. במילים פשוטות: מי שהולך מקו המשווה לעבר קוטב רואה את הספירה עולה ויורדת בדרך, אבל הרצועה האחרונה לפני הקוטב מכילה בערך פי שניים מכתשים ליחידת שטח מן הרצועה הדלה ביותר בדרך.

פרופיל קו האורך שונה. לפני המסכה, בקבוצת $20 \leq \text{ק"מ}$, הצפיפות נעה מכ-84 למיליון קמ"ר ברצועה 315° – 345° מזרח • ועד כ-251 למיליון קמ"ר ברצועה 105° – 135° מזרח •. היחס בין השיא למינימום — צפיפות הרצועה העשירה ביותר חלקי צפיפות הדלה ביותר, מדד פשוט למידת אי-האחידות של פרופיל — הוא כ-2.97. בקבוצת $40 \leq \text{ק"מ}$ הטווח הוא כ-31 עד 90 למיליון קמ"ר, ויחס השיא למינימום כ-2.88. אי-האחידות לאורך קו האורך בספירה הגולמית גדולה אפוא אף יותר מזו שנראית בפרופיל קו הרוחב: הקפת הירח לאורך קו המשווה משנה את הצפיפות יותר מן המעבר מקו המשווה אל קוטב.

קורא מומחה עשוי לטעון כאן כי עודף קוטבי של פי שניים בערך קטן לעומת טווח של פי שלושה בערך לאורך קו האורך, וכי התוצאה הקוטבית עשויה להיות תוצר לוואי של הדפוס הגדול יותר. התשובה היא ששני הפרופילים נמדדים בכיוונים מאונכים זה לזה: רצועת רוחב מכילה את כל קווי האורך, כך שקו אורך עשיר וקו אורך דל נכנסים שניהם לכל רצועת רוחב באותו יחס. עצם קיומם של שני פרופילים שונים מחייב להפריד ביניהם. העובדה שאזור עשיר או דל במכתשים לאורך ציר קו האורך אינה כשלעצמה הסבר לצפיפות הגבוהה בקווי הרוחב הקוטביים. האסימטריה לאורך קו האורך היא נושא נפרד, ונדונה עם ששת הצירים (A.9). השאלה כאן צרה יותר: מה נשאר מן הדפוס הקוטבי כשהוא נבדק בנפרד ובאותה שיטה.

A.5.2 — המסכה כבדיקת בקרה. A.3 ו-A.4 אינן ספירה נוספת של אוכלוסייה אחרת. הן חוזרות על שתי בדיקות הרצועות לאחר החלת אותה מסכה: 20 האגנים שקוטרם $500 \leq \text{ק"מ}$ ומצולעי הימות של LROC. מכתשים שמרכזיהם נמצאים בתוך המסכה הוצאו מן הספירה, והשטח הממוסך הופחת מן המכנה שבו חושבה הצפיפות.

מדוע דווקא שני סוגי קרקע אלה? הימות ומישורי הבזלת הם רצפות צעירות: בים — פתח מעל כיפת הזנה — המכתשים שעמדו שם הומסו, ומישור בזלת הוא קרום שהותך בחום הכללי של כדור הארץ; הם דלים במכתשים מסיבה שאין לה קשר לקו הרוחב, והם שוכנים ברובם ליד קו המשווה. האגנים הגדולים מחקו בהיווצרותם את המכתשים שבתוכם. שניהם משטחים שעליהם תיעוד המכתשים העתיק אופס מאוחר יותר. כדי להשוות בהגינות את הקטבים לקו המשווה, יש להוציא את אותם סוגי קרקע משני צדי ההשוואה — אחרת צד אחד נמדד על קרקע עתיקה והאחר על קרקע שחודשה בחלקה, וההשוואה מוודדת את החידוש ולא את קו הרוחב. זהו הכלל שהמאמר שומר עליו לכל אורכו: כל השוואה היא שווה בשווה, וההוצאות מפורטות במפורש. כאן מוחלת אותה מסכה על כל רצועה.

נקודה זו חיונית לפרשנות. ירידה במספר המכתשים לאחר המסכה אינה מחייבת ירידה בצפיפות. אם המסכה מוציאה חלק גדול יותר מן השטח מאשר מן המכתשים, הצפיפות בשטח הנותר יכולה אף לעלות. ההשוואה הרלוונטית היא אפוא לא רק N_{before} מול N_{after} , אלא הצפיפות המחושבת ביחס לשטח הזמין בכל אחד משני המצבים. תמונה יומיומית: כדי לספור עצים לדונם ביער שיש בו בריכה, סופרים על היבשה ומחלקים בשטח היבשה. הוצאת הבריכה מן השטח מעלה את המספר, אף שלא נוסף אפילו עץ אחד — בבריכה לא היו עצים, והיא רק דיללה את הממוצע.

אותה פעולה אנליטית הוחלה הן על פרופיל קו הרוחב והן על פרופיל קו האורך. ההבדל באופן שבו שני הפרופילים מגיבים למסכה הוא אפוא מידע כשלעצמו: אילו שתי האסימטריות היו בעיקר תוצאה של אותם אגנים ושל אותם משטחי ימות, היה מצופה שהוצאתם תשנה את שני הפרופילים באופן דומה. אין זה מה שמתקבל.

A.5.3 — קו האורך: חלק גדול מן המשרעת משתנה לאחר המסכה. השפעת המסכה בולטת במיוחד בפרופיל קו האורך. לפני ההוצאה, המינימום של קבוצת $20 \leq$ ק"מ נמצא ברצועה $315-345^{\circ}$ מזרח, שבה הצפיפות כ-84 למיליון קמ"ר. לאחר ההוצאה, הצפיפות המחושבת על השטח הנותר של אותה רצועה עולה לכ-176 למיליון קמ"ר. הטווח כולו לאורך קו האורך מצטמצם בעקבות זאת במידה ניכרת: יחס השיא למינימום יורד מכ-2.97 לפני המסכה לכ-1.68 אחריה.

אותו צמצום מגיע גם לשתי הרצועות סביב קו האורך המאסף וקו האורך המוביל. לפני המסכה הרצועה המאספת, $75-105^{\circ}$ מזרח, נושאת 750 מכתשים של $20 \leq$ ק"מ לעומת 487 ברצועה המובילה, $255-285^{\circ}$ מזרח: 237 לעומת 154 למיליון קמ"ר, יחס של 1.54, כשבע סטיות תקן של ספירה. (ספירת מכתשים משתנה באקראי בערך כשורש הספירה: רצועה ובה כמה מאות מכתשים אינה ודאית בכמה אחוזים. **סטיית תקן של ספירה** היא התנודה הטבעית הזו; הבדל של שבע כאלה אינו יכול להיות מקרי, הבדל של אחת — יכול.) לאחר המסכה הרצועה המובילה שומרת יותר מכתשים, 417 לעומת 370, אך גם יותר שטח, 2.044 לעומת 1.692 מיליון קמ"ר, משום שהמסכה מוציאה יותר שטח ימות בצד המאסף; הצפיפויות הופכות ל-219 ול-204, יחס של 1.07. אי-הוודאות של הספירה ביחס זה היא כ-7%, כך שההבדל הנותר הוא כסטיית תקן אחת ואינו מובהק ברמת הרצועות; ב- $40 \leq$ ק"מ הוא 77 לעומת 74. הרצועות מייחסות אפוא את רוב האסימטריה הגולמית בין מזרח למערב לשטחים הממוסכים עצמם. הן אינן ממצות אותה: רצועה נמתחת מקוטב לקוטב ומדללת את האזור שסביב הנקודה בכל אורכה. הכיפות של 30° סביב שתי הנקודות (A.9) שומרות, לאחר המסכה, על 252 לעומת 174 למיליון קמ"ר, יחס של 1.45, כחמש סטיות תקן. העודף ששורד את המסכה נמצא באזור שסביב 90° מזרח, ולא לאורך הרצועה כולה. זהו גם שיעור ראשון בגאומטריה שהכיפות שלהלן ישתמשו בו: רצועה ארוכה יכולה להסתיר עודף מקומי על ידי מיצונו עם הרבה קרקע רגילה, בעוד כיפה שמרכזו בנקודה הנכונה שומרת עליו.

אותה בדיקה בקבוצת $40 \leq$ ק"מ נותנת תוצאה מקבילה. יחס השיא למינימום, כ-2.88 ללא מסכה, יורד לכ-1.79 לאחר ההוצאה. העובדה ששתי קבוצות הקוטר מגיבות באותו כיוון מחזקת את המסקנה התיאורית שהמשרעת הגדולה של פרופיל קו האורך ללא מסכה קשורה, במידה משמעותית, לפיזור השטחים הנכללים במסכה.

המסכה אינה הופכת את פרופיל קו האורך לאחיד. גם לאחר ההוצאה נשאר טווח מדיד בין רצועות האורך. התוצאה כפולה אפוא: חלק ניכר מן המשרעת הגולמית משתנה כשמוציאים את האגנים והימות, אבל המסכה לבדה אינה מסבירה את כל אי-האחידות לאורך קו האורך.

זהו גם גבול השימוש בפרופיל זה במאמר הנוכחי. A.2 ו-A.4 נחוצות כדי להראות שקיימת אסימטריה מרחבית נוספת, וכדי שלא תיוחס בטעות לקטבים. ההסבר הפיזיקלי של האסימטריה לאורך קו האורך אינו נדרש לבחינת השאלה הקוטבית, ולכן הוא נשאר מחוץ לטיעון המרכזי של מאמר זה.

A.5.4 — קו הרוחב: הצפיפות הקוטבית נשארת לאחר ההוצאה. פרופיל קו הרוחב מגיב למסכה אחרת. הדוגמה הברורה ביותר היא הרצועה הדרומית הסמוכה לקוטב, $75-90^{\circ}$ דרום. לפני המסכה נספרו בה 139

מכתשים שקוטנם $20 \geq$ ק"מ, בצפיפות של כ-215 למיליון קמ"ר. לאחר המסכה נותרים רק 84 מכתשים. אבל השטח הנותר מצטמק לכ-0.275 מיליון קמ"ר, ולכן הצפיפות המחושבת עליו עולה לכ-305 למיליון קמ"ר. הסיבה היא South Pole–Aitken, האגן הגדול ביותר במסכה, שמכסה חלק ניכר מרצועה זו: רצפתו דלה במכתשים (המינימום המרכזי שלו נמדד ב-A.10), ולכן הוצאתו גורעת שטח גדול ומעט מכתשים יחסית — הברירה מן התמונה שלעיל.

לא נוצרים כאן מכתשים חדשים ומספרם אינו עולה. התוצאה נובעת מן המכנה: השטח שהוצא מן הרצועה גדול, באופן יחסי, מן החלק של אוכלוסיית המכתשים שהוצא יחד איתו. זו בדיוק הסיבה שהיה צורך לחשב מחדש את השטח, ולא רק להשוות את הספירות.

בצפון התמונה שונה בפרטים אך דומה בתוצאתה הסופית. ברצועה 75° – 90° צפון • הספירה ללא מסכה נתנה 194 מכתשים $20 \geq$ ק"מ וצפיפות של כ-300 למיליון קמ"ר. המסכה כמעט אינה משנה רצועה זו בנתונים שבהם נעשה כאן שימוש, והצפיפות נשארת סביב 300 למיליון קמ"ר.

לאחר ההוצאה, אם כן, שתי הרצועות הסמוכות לקטבים • מגיעות כמעט לאותה צפיפות: כ-305 למיליון קמ"ר בדרום וכ-300 בצפון. זה שונה מאוד מן המראה הראשון של הספירה ללא מסכה, שבה הדרום נראה דל במידה משמעותית מן הצפון — כ-215 לעומת 300 למיליון קמ"ר.

A.5.5 — מה למדנו מן ההבדל בין שני הקטבים. ההשוואה בין צפון לדרום היא אחת התוצאות החשובות של בדיקת המסכה. לפני ההוצאה ניתן היה לקרוא את הטבלה כאילו קיימת אסימטריה אמיתית בין הקטבים: הקוטב הצפוני צפוף בהרבה מן הדרומי. לאחר הוצאת האגנים והימות, אסימטריה זו כמעט נעלמת בקבוצת $20 \geq$ ק"מ.

במסכה הדרומית נמצא South Pole–Aitken, האגן הגדול ביותר שנכלל בבדיקה, והוא מוציא חלק גדול מן השטח ברצועות הדרומיות הגבוהות. התוצאה מראה אפוא שחלק ניכר מן ההבדל הגולמי בין צפון לדרום נובע מן השטח שהוצא בדרום, ולא מהבדל יסודי בין שתי אוכלוסיות קוטביות.

השיעור הוא שיעור בשיטה לא פחות משהוא תוצאה. ההשוואה הגולמית העמידה רצועה צפונית של קרקע עתיקה שכמעט לא נפגעה מול רצועה דרומית שחלק גדול ממנה הוא רצפת אגן. זו אינה השוואה שווה בשווה. ברגע שמוציאים את אותם סוגי קרקע משני הצדדים, שתי הרצועות הקוטביות מושוות על אותו סוג משטח, והן מתיישבות זו עם זו.

המסקנה הישירה היא שהפער בין צפון לדרום שנראה לפני המסכה אינו נשמר לאחר המסכה המלאה.

התוצאה החשובה לשאלה של מאמר זה היא אחרת: כשמסירים את ההבדל הגולמי בין צפון לדרום, לא מתקבלים קוטב אחד צפוף וקוטב אחד דל. מתקבלות שתי רצועות קוטביות בעלות צפיפות דומה וגבוהה.

A.5.6 — מה מאפשרות ארבע הבדיקות להסיק — ומה עדיין לא. ארבע בדיקות הרצועות מאפשרות כעת לצמצם את הבעיה.

ראשית, הצפיפות הקוטבית אינה תיאור של הקוטב הצפוני בלבד. לאחר המסכה מופיעה צפיפות גבוהה ודומה בשתי הרצועות הסמוכות לקטבים.

שנית, היא אינה נעלמת כשמוציאים מן הספירה את האגנים הגדולים ואת משטחי הימות הנכללים במסכה. למעשה, במקרה הדרומי הצפיפות המחושבת על השטח הנותר גבוהה מן הצפיפות ללא מסכה.

שלישית, היא אינה פשוט שם אחר לאסימטריה לאורך קו האורך. קו האורך מראה פרופיל שונה, במשרעת שונה ובתגובה שונה למסכה. חלק גדול מן המשרעת לאורך קו האורך משתנה לאחר ההוצאה, בעוד הצפיפות הגבוהה בקצוות הקוטביים נשארת.

רביעית, אין צורך לטעון שהצפיפות גדלה באופן מונוטוני מקו המשווה אל הקטבים. הנתונים אינם מחייבים טענה כזו ואינם תומכים בפרופיל חלק שכזה. הממצא הצר יותר – ולכן החזק יותר – הוא שהרצועות הסמוכות לקטבים נמצאות בקצה העליון של התפלגות קו הרוחב, ושמצב זה נשמר לאחר בדיקת המסכה.

במובן זה A.1–A.4 סוגרות את השאלה הראשונה של חלק A: **האם המראה הקוטבי יכול להיעלם כשמשנים את כיוון החיתוך או כשמוציאים את האגנים הגדולים והימות?** בתוך הקטלוג, הספים והמסכה שנבדקו כאן, הוא אינו נעלם. שינוי כיוון החיתוך חושף תופעה מרחבית נוספת אך שונה; החלת המסכה משנה מאוד חלקים מן הפרופילים, אבל משאירה את שתי הרצועות הקוטביות בצפיפות גבוהה.

עם זאת, יש גם גבול ברור למה שניתן ללמוד מרצועות.

הרצועה 75° – 90° • מקיפה את הירח כולו סביב ציר הסיבוב. היא דוחסת למספר אחד את כל קווי האורך שבתוכה. לכן גם אם הרצועה צפופה, היא אינה יכולה לומר כיצד הצפיפות מסודרת **בתוך האזור הקוטבי עצמו**. אותה צפיפות ממוצעת יכולה, עקרונית, לנבוע מהצטברות קרובה מאוד לקוטב, מטבעת במרחק מסוים ממנו, מריכוז בצד אחד של הכיפה, או מפיזור רחב ואחיד יחסית. הגאומטריה של הרצועות אינה מבחינה בין האפשרויות הללו. זה כמו לדעת את המספר הממוצע של אנשים למ"ר באולם עגול בלי לדעת אם הם עומדים במרכז, לאורך הקירות או באופן שווה ברחבי החדר.

A.5.7 – סוף שלב הרצועות והמעבר לכיפות. בנקודה זו העבודה שהרצועות מסוגלות לעשות הסתיימה.

מה שיש בידינו כעת, בשורה אחת: צפיפות מכתשים גבוהה בשני הקצוות הקוטביים של פרופיל קו הרוחב, נפרדת מן הדפוס שבין מזרח למערב, ועדיין קיימת לאחר הוצאת האגנים והימות. בפירוט רב יותר, הרצועות הראו **היכן** נמצאת האנומליה ביחס לקו הרוחב; הן הפרידו אותה מן האסימטריה לפי קו האורך; הן בחנו כיצד שני הדפוסים משתנים כשמוציאים את אותם אגנים ואת אותם משטחי ימות; והן הראו שלאחר ההוצאה מתקבלות שתי רצועות קוטביות בעלות צפיפות גבוהה ודומה.

אבל הרצועות אינן יכולות לענות על השאלה הבאה.

עד כה שאלנו: **האם קווי הרוחב הקוטביים צפופים יותר, והאם התוצאה נשארת לאחר בקרות מרחביות?**

מכאן השאלה הופכת גאומטרית יותר:

כיצד מסודרת אותה צפיפות בתוך הקוטב עצמו?

כדי לענות עליה יש לשנות את צורת המדידה. במקום לחלק את הירח לרצועות המקיפות אותו, אנו מתבוננים בכל קוטב כמרכזה של כיפה ובוחנים את ההתפלגות ביחס למרחק מן הקוטב.

הסעיף הבא, **A.6 – הכיפות הקוטביות**, אינו אפוא חזרה נוספת על אותה ספירה. הוא השלב הבא, הנובע ישירות מגבול בדיקת הרצועות: המעבר מן השאלה **האם קיימת צפיפות קוטבית גבוהה** אל השאלה **מהי הגאומטריה המרחבית של צפיפות זו בתוך הכיפה הקוטבית**.

A.6 הכיפות הקוטביות, ללא מסכה

לאחר שבדיקות הרצועות קבעו את התנהגות הצפיפות בקווי הרוחב הגבוהים, אנו משנים כאן את הגאומטריה של המדידה. במקום רצועות המקיפות את הירח, כל קוטב משמש מרכז לסדרה של שש כיפות קונצנטריות שרדיוסיהן 10° , 15° , 20° , 30° , 45° ו- 60° . מטרת הבדיקה היא לראות כיצד משתנה הצפיפות המצטברת במעבר מכיפה רחבה אל האזור הקרוב יותר לקוטב.

מהי בדיקת כיפה קוטבית. כיפה קוטבית היא כתם פני השטח העגול שמרכזו בקוטב, כמו הכיפה הלבנה בראשו של גלובוס. גודלה ניתן ברדיוס הזוויתי שלה: כיפה של 30° מכילה את כל מה שנמצא בטווח 30° קשת

מן הקוטב, כלומר את כל מה שנמצא מעבר לקו הרוחב 60° , לכיוון הקוטב. הבדיקה סופרת את המכתשים בכיפה כזו ומשווה את צפיפותם לצפיפות של אזור ייחוס הרחוק משני הקטבים — חגורת המשווה $15^\circ < |\phi|$, הפס שבטווח 15° מקו המשווה (ϕ הוא קו הרוחב). ההשוואה העיקרית של המאמר (A.11, D.1) היא בדיוק מסוג זה: שתי הכיפות של 30° סביב הקטבים מול חגורת המשווה $15^\circ < |\phi|$. כאן אותו רעיון מוחל על משפחה שלמה של כיפות, מ- 60° ועד 10° , כדי שניתן יהיה לעקוב אחר הצפיפות פנימה, לעבר כל קוטב.

כיפה ברדיוס זוויתי θ כוללת את כל המכתשים שמרכזיהם אינם רחוקים מן הקוטב יותר מ- θ . שטחה: $A(\theta) = 2\pi R^2 (1 - \cos \theta)$, כאשר $R = 1737.4$ ק"מ. הנוסחה היא שטחה של כיפה כדורית: R הוא הרדיוס הממוצע של הירח, והגורם $(1 - \cos \theta)$ גדל לאט בכיפות קטנות ומהר בכיפות גדולות, כך שלכיפה של 10° יש 0.288 מיליון קמ"ר ולכיפה של 60° יש 9.483 מיליון קמ"ר — יותר מפי שלושים. הכיפות מקוננות זו בתוך זו, ולכן השורות הן פרופיל מצטבר ולא אזורים טבעתיים בלתי תלויים. דמיינו את הטבעות של לוח מטרה לחצים: הכיפה של 30° אינה הטבעת שבין 20° ל- 30° , אלא הלוח כולו עד 30° , כולל מרכז המטרה. אם המכתשים צפופים ליד הקוטב, הכיפות הקטנות מראות צפיפות גבוהה והצפיפות יורדת ככל שהכיפות מתרחבות וקולטות יותר קרקע רגילה; אם הם מפוזרים באופן שווה, כל כיפה מראה בערך אותה צפיפות.

נקודת הייחוס: $1 =$ הצפיפות של רצועת המשווה המלאה 15° דרום- 15° צפון, ללא מסכה. ≥ 20 : 166.435637277 למיליון קמ"ר; ≥ 40 : 53.169769069 . היחס אינו מחושב ביחס לכיפה הרחבה או ביחס לקוטב האחר.

כיצד לקרוא את היחסים. עמודת היחס היא צפיפות הכיפה חלקי ייחוס קבוע זה. יחס של 1 פירושו שהכיפה צפופה בדיוק כמו רצועת המשווה; 1.36 פירושו 36% יותר מכתשים ליחידת שטח; 1.80 פירושו 80% יותר. משום שכל כיפה, צפונית ודרומית, מחולקת באותו מספר, ניתן להשוות את היחסים ישירות לאורך העמודה. הייחוס הוא רצועת המשווה באותו קטלוג וללא מסכה, וגם הכיפות של $A.6$ הן ללא מסכה, כך ש- $A.6$ משווה קרקע גולמית לקרקע גולמית בשני הצדדים. שני הרגלים נוספים עוזרים. ראשית, יחס נשען על ספירות, וספירה של כמה עשרות מכתשים ודאית הרבה פחות מספירה של כמה מאות: הכיפות הפנימיות מכילות את המעט ביותר מכתשים, והיחסים שלהן נושאים את אי-הוודאות הרחבה ביותר (טווחי ה- 95% ניתנים ב-D.4). שנית, עמודות ≥ 40 ק"מ הן מדגם שני של מכתשים גדולים יותר, ולכן בממוצע עתיקים יותר; היכן שהיחס שלהם גבוה מזה של קבוצת ≥ 20 ק"מ באותה כיפה, העודף הקוטבי גדל עם גודל המכתש — נקודה שנדונה ב-A.8.5.

עמודות הצפיפות והיחס צבועות מצהוב רך לערכים הנמוכים ועד אדום רך לגבוהים. לכל קבוצת קוטר סולם משלה; לצבעים אין משמעות מעבר לסדר זה — הם אינם מבחן, אלא רק מדריך שמאפשר לעין למצוא מיד היכן בטבלה הצפיפות הגבוהה ביותר.

low density high density

מקרא הצבעים: מעבר רציף מצהוב רך ("צפיפות נמוכה") לאדום רך ("צפיפות גבוהה").

כיפה	קוטב	רדיוס הכיפה	שטח הכיפה, 10^6 קמ"ר	$N \geq 20$	צפיפות ≥ 20	יחס ≥ 20	$N \geq 40$	צפיפות ≥ 40	יחס ≥ 40
•	הקוטב הצפוני	60°	9.483	1,794	189	1.14	600	63	1.19
•	הקוטב הצפוני	45°	5.555	1,102	198	1.19	393	71	1.33

הקוטב הצפוני	30°	2.541	577	227	1.36	222	87	1.64
הקוטב הצפוני	20°	1.144	309	270	1.62	119	104	1.96
הקוטב הצפוני	15°	0.646	194	300	1.80	65	101	1.89
הקוטב הצפוני	10°	0.288	86	298	1.79	31	108	2.02
הקוטב הדרומי	10°	0.288	72	250	1.50	26	90	1.70
הקוטב הדרומי	15°	0.646	139	215	1.29	53	82	1.54
הקוטב הדרומי	20°	1.144	237	207	1.24	83	73	1.36
הקוטב הדרומי	30°	2.541	536	211	1.27	185	73	1.37
הקוטב הדרומי	45°	5.555	1,229	221	1.33	415	75	1.41
הקוטב הדרומי	60°	9.483	2,035	215	1.29	687	72	1.36

טבלה: צפיפות המכתשים בשש כיפות קונצנטריות סביב כל קוטב, ללא מסכה (A.6). צפיפות במכתשים למיליון קמ"ר; יחס ביחס לרצועת המשווה 15° דרום–15° צפון ללא מסכה.

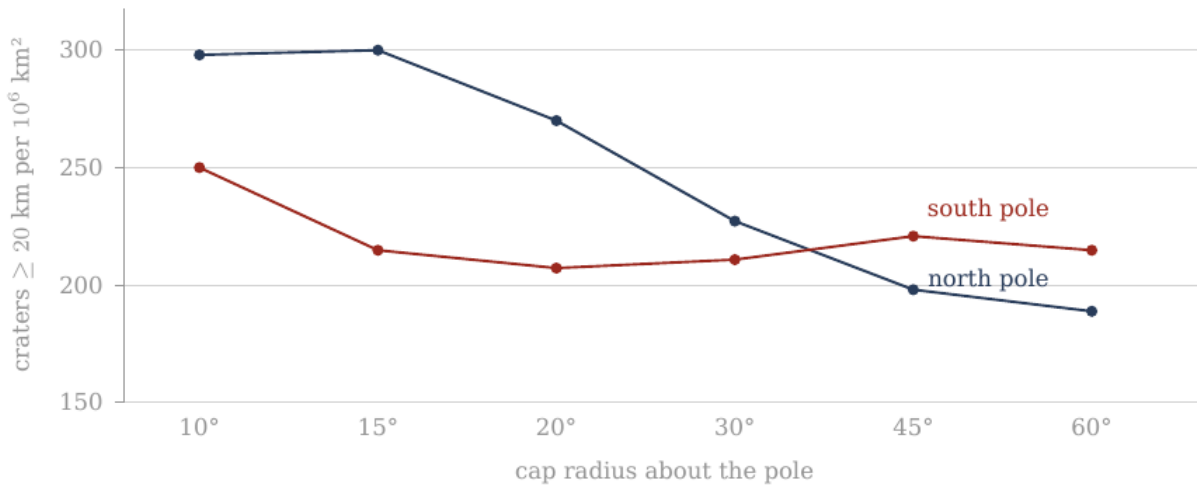
כיצד לקרוא את הטבלה: הטבלה מסודרת באופן סימטרי: בצפון קוראים מ-60° אל 10°, ובדרום מ-10° אל 60°, כך ששתי הכיפות הפנימיות של 10° נפגשות במרכז הטבלה והכיפות מתרחבות כלפי חוץ. עלייה בצפיפות ככל שהרדיוס קטן מצביעה על ריכוז פנימי; פרופיל דומה לאורך הרדיוסים מצביע על פיזור רחב יותר. מאחר שהכיפות מקוננות, אין לקרוא אף שורה כטבעת נפרדת.

התוצאה ללא מסכה: בצפון צפיפות ≥ 20 עולה מכ-189 בכיפה של 60° לכ-300 בכיפה של 15°, ונשארת כמעט זהה ב-10° (כ-298). בדרום היא נשארת סביב 207–221 לאורך רוב הטווח 15°–60°, ועולה לכ-250 בכיפה של 10°. קבוצת ≥ 40 מאפשרת לבדוק אם אותה גאומטריה מתקיימת גם בסף הקוטר הגבוה: בצפון היא עולה מכ-63 בכיפה של 60° לכ-108 בכיפה של 10°, יחס של 2.02 לרצועת המשווה בכיפה הפנימית ביותר. בעמודת היחס אותה תמונה נקראת בפשטות: כל כיפה בשני הקטבים עומדת מעל 1 — הנמוכה ביותר היא 1.14, הכיפה הצפונית של 60° ב-20 $\geq$ ק"מ — כך שאין כיפה קוטבית בשום גודל שדלה במכתשים כמו רצועת המשווה.

במבט ראשון, אם כן, שני הקטבים נראים שונים: הצפון צפוף לעבר מרכזו, הדרום שטוח. הסעיף הבא שואל כמה מן ההבדל הזה שייך לקרקע עצמה וכמה לאגן שתופס את הדרום.

גבול הפרשנות

A.6 משתמשת בקטלוג ללא מסכה. ממנה עדיין אי אפשר להסיק איזה חלק מן ההבדל בין צפון לדרום קשור לאגנים ולימות. אותה בדיקה עם המסכה מופיעה ב-A.7, והסיכום ניתן רק ב-A.8.



איור 5. צפיפות המכתשים שקוטנם 20 ק"מ ומעלה בכיפות שרדיוסן הולך וגדל סביב שני הקטבים (A.6), הקטלוג כולו. הצפון עולה לעבר הקוטב שלו; הדרום שטוח — רצפת South Pole–Aitken, שהכיפה הדרומית של 30° היא ברובה (A.3, D.4). (בשרטוט: ציר אופקי — "רדיוס הכיפה סביב הקוטב", 10°, 15°, 20°, 30°, 45°, 60°; ציר אנכי — "מכתשים ≥ 20 ק"מ ל- 10^6 קמ"ר", 150–300; הקו הכחול-כהה — "הקוטב הצפוני"; הקו האדום — "הקוטב הדרומי").

איור 5 משרטט את עמודות הצפיפות של ≥ 20 ק"מ מן הטבלה כשני קווים, כשרדיוס הכיפה גדל ימינה. קראו אותו משמאל (הכיפות הקטנות שליד הקוטב) לימין (הכיפות הרחבות). הקו הצפוני הכחול-כהה מתחיל גבוה ויורד ככל שהכיפות מתרחבות: המכתשים צפופים לעבר הקוטב הצפוני. הקו הדרומי האדום נשאר כמעט מישורי אחרי הנקודה הראשונה שלו: בתוך הכיפות הדרומיות, הצפיפות הגולמית כמעט אינה תלויה במרחק מן הקוטב.

A.7 הכיפות הקוטביות לאחר הוצאת האגנים והימות

השאלה של סעיף זה היא אם ההבדל בין הקטבים שנראה ב-A.6 הוא תכונה של אוכלוסיית המכתשים או של הקרקע שעליה היא נספרת. A.7 חוזרת בדיוק על שש הכיפות של A.6 סביב כל קוטב, אבל לאחר החלת אותה מסכה שבה נעשה שימוש ב-A.3 וב-A.4. מכתשים שמרכזיהם נמצאים בתוך המסכה הוצאו מן הספירה, ושטח המסכה הופחת מכל כיפה. כך שני הקטבים מושווים על אותו סוג קרקע — משטח עתיק מחוץ לאגנים ולימות — וזה מה שכלל ההשוואה שווה בשווה של המאמר דורש.

נקודת הייחוס נשארת אותה נקודה: $1 =$ הצפיפות של רצועת המשווה המלאה 15° דרום–15° צפון, ללא מסכה. $20 \leq 166.435637277$; $40 \geq 53.169769069$ למיליון קמ"ר.

השינוי בצפיפות מחושב לכל כיפה מול אותה כיפה ב-A.6: $\Delta\rho = \left(\rho_{\text{after}} / \rho_{\text{before}} - 1 \right) \times 100\%$. הוא שונה אפוא מעמודת היחס לקו המשווה. במילים: עמודת השינוי אומרת בכמה עלתה או ירדה הצפיפות של כיפה נתונה כשהוצאו האגנים והימות. לדוגמה, הכיפה הדרומית של 15° עברה מכ-215 לכ-305 למיליון קמ"ר, שינוי של +42.0%; ערך של 0.0% פירושו שהמסכה כלל לא נגעה בכיפה זו.

איזה יחס הוא הנקי

בטבלה זו הכיפות ממוסכות, אבל הייחוס — רצועת המשווה — נשמר כפי שהיה ב-A.6, ללא מסכה. זה מכון: קנה מידה קבוע מאפשר לראות מה עשתה המסכה לכל כיפה, ועמודת השינוי מודדת בדיוק זאת. אבל זו אינה השוואה שווה בשווה בין קוטב לקו המשווה, משום שרצועת המשווה עדיין מכילה את הימות שלה, שהם דלים במכתשים ומורידים את צפיפותה. עמודת היחס של A.7 היא אפוא סרגל קבוע למעקב

אחר השינוי, ולא העודף הקוטבי הנמדד. ההשוואה הנקייה מוציאה את אותה קרקע משני הצדדים — את הימות ואת South Pole–Aitken מן הכיפות ומן החגורה כאחד — ומשווה את הכיפות של 30° לחגורת המשווה 15° < |φ| (A.11, D.1). תוצאותיה, לפי הסדר: 1.32 לקטלוג כולו כשהימות כלולים; 0.04 ± 1.11 כשהימות מוצאים משני הצדדים; 0.05 ± 1.20 כשהימות ו-South Pole–Aitken מוצאים משני הצדדים. המספר שאחרי ± הוא סטיית תקן אחת של הספירה; טווח ה-95% רחב בערך פי שניים: היחס האמיתי נמצא, בביטחון של 95%, בין 1.10 ל-1.30 (גרסה קודמת קראה את ה-± כטווח ה-95%, 1.15–1.25) — בבידור מעל 1. על הספירה הנקייה הזו נשענת מסקנת המאמר.

שיטה

אותה מסכה כמו ב-20 — A.3/A.4 אגני Neumann שקוטרם 500 ≥ ק"מ ככיפות כדוריות + מצולעי LROC_GLOBAL_MARE_180; השטח מחושב על רשת של 0.05°×0.05°; חפיפות נספרות פעם אחת; מכתש משויך לפי מרכזו. היכן שכיפה וקבוצת רצועות מכסות את אותו אזור (הכיפות של 30° והרצועות 60°–90°), A.3 ו-A.7 נותנות אותו שטח ואותן ספירות. הסיכום ומשמעותו נשמרים ל-A.8.

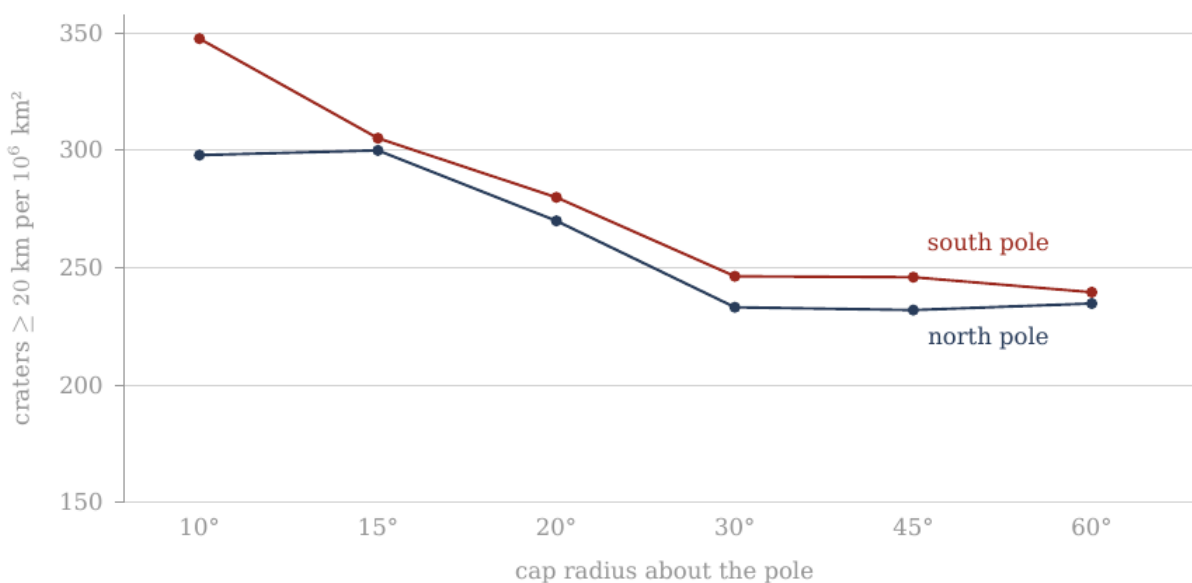
במילים פשוטות: כל אגן גדול מרשימת Neumann משורטט ככתם עגול, הימות נלקחים מן המתארים שמופו בידי מצלמת Lunar Reconnaissance Orbiter (LROC), ופני השטח מחולקים לריבועים קטנים שצלעם 0.05°. כדי למדוד כמה מכל כיפה מכוסה במסכה; היכן שאגן וים חופפים, השטח המשותף מוצא פעם אחת בלבד. מכתש נחשב בתוך המסכה כשמרכזו בתוכה.

כיפה	קוטב	רדיוס	שטח נותר, 10^6 קמ"ר	$N \geq 20$	צפיפות ≥ 20	יחס ≥ 20	שינוי ≥ 20	$N \geq 40$	צפיפות ≥ 40	יחס ≥ 40	שינוי ≥ 40
הקוטב הצפוני	60°	6.448	1,515	235	1.41	+24.2%	507	79	1.48	+24.3%	
הקוטב הצפוני	45°	4.037	935	232	1.39	+16.7%	336	83	1.57	+17.6%	
הקוטב הצפוני	30°	2.399	560	233	1.40	+2.8%	213	89	1.67	+1.6%	
הקוטב הצפוני	20°	1.144	309	270	1.62	+0.0%	119	104	1.96	+0.0%	
הקוטב הצפוני	15°	0.646	194	300	1.80	+0.0%	65	101	1.89	+0.0%	
הקוטב הצפוני	10°	0.288	86	298	1.79	+0.0%	31	108	2.02	+0.0%	
הקוטב הדרומי	10°	0.104	36	348	2.09	+39.1%	14	135	2.54	+49.8%	
הקוטב הדרומי	15°	0.275	84	305	1.83	+42.0%	34	124	2.32	+50.7%	
הקוטב הדרומי	20°	0.532	149	280	1.68	+35.2%	52	98	1.84	+34.7%	
הקוטב הדרומי	30°	1.308	322	246	1.48	+16.7%	105	80	1.51	+10.3%	

•	הקוטב הדרומי	45°	2.852	702	246	1.48	+11.3%	214	75	1.41	+0.5%
•	הקוטב הדרומי	60°	4.918	1,178	240	1.44	+11.6%	364	74	1.39	+2.2%

טבלה: אותן שש כיפות סביב כל קוטב לאחר הוצאת האגנים והימות (A.7). צפיפות במכתשים למיליון קמ"ר על השטח הנותר; יחס ביחס לרצועת המשווה ללא מסכה; שינוי ביחס לאותה כיפה ב-A.6.

כיצד לקרוא: הטבלה מסודרת באופן סימטרי: בצפון מ-60° אל 10°, ובדרום מ-10° אל 60°, כך ששתי הכיפות הפנימיות של 10° עומדות זו מול זו במרכז הטבלה. מאחר שהכיפות מקוננות, זהו פרופיל מצטבר ולא סדרה של טבעות נפרדות. ההשוואה ל-A.6 מראה מה עשתה המסכה בכל רדיוס. שני דברים בולטים. בצפון, שלוש הכיפות הפנימיות (10°, 15°, 20°) מראות שינוי של +0.0% בשני הספים ואותו שטח כמו קודם: אין אגן או ים בטווח 20° מן הקוטב הצפוני, ולכן דבר לא הוצא. בדרום השינויים הגדולים ביותר הם בכיפות הקטנות ביותר — +39.1% ב-10° ו-42.0% ב-15° עבור ≥ 20 ק"מ — והשטח הנותר של הכיפה של 10° יורד מ-0.288 ל-0.104 מיליון קמ"ר: רוב הכיפה הדרומית הפנימית ביותר נמצא בתוך המסכה.



איור 6. אותן שש כיפות סביב שני הקטבים לאחר הוצאת האגנים והימות (A.7), מכתשים של 20 ק"מ ומעלה. הקו הצפוני אינו משתנה בטווח 20°; הקו הדרומי עולה בכיפות הפנימיות שלו, והשניים מתקרבים. (בשרטוט: ציר אופקי — "רדיוס הכיפה סביב הקוטב", 10°, 15°, 20°, 30°, 45°, 60°; ציר אנכי — "מכתשים ≥ 20 ק"מ ל-10⁶ קמ"ר", 150–350; הקו הכחול-כהה — "הקוטב הצפוני"; הקו האדום — "הקוטב הדרומי").

הניחו את איור 6 לצד איור 5. החצי השמאלי של הקו הכחול-כהה זהה בשניהם; חציו הימני, הכיפות הרחבות, עלה. הקו האדום שינה את צורתו: כעת הוא יורד מן הקוטב כלפי חוץ, כמו הקו הצפוני. ברגע ששני הקטבים נספרים על אותו סוג קרקע, שניהם מראים מכתשים הצפופים לעבר הקוטב.

A.8 סיכום ומסקנות מבדיקת הכיפות

A.6 ו-A.7 בחנו את האזורים הקוטביים בגאומטריה שונה מזו של בדיקות הרצועות. במקום לשאול מהי הצפיפות הממוצעת בתוך רצועת רוחב המקיפה את הירח, כל קוטב הוגדר כמרכז של סדרת כיפות קונצנטריות שרדיוסיהן 10°, 15°, 20°, 30°, 45° ו-60°. אותה בדיקה נעשתה תחילה על הקטלוג ללא מסכה ואחר כך לאחר הוצאת אותם 20 אגנים גדולים ומצולעי ימות שבהם נעשה שימוש ב-A.3 וב-A.4.

הצירוף של שתי הבדיקות מאפשר להפריד בין שתי שאלות. הראשונה היא **מהי הגאומטריה הנצפית של צפיפות המכתשים כשמתקרבים לכל קוטב**. השנייה היא **איזה חלק מגאומטריה זו נשאר כשמוציאים את האגנים הגדולים והימות מן המדידה**.

התוצאה המרכזית היא שהמסכה משנה מן היסוד את האופן שבו יש לתאר את ההבדל בין שני הקטבים. סעיף זה מציג את השינוי הזה צעד אחר צעד: כיצד נראו הקטבים לפני המסכה (A.8.1), מה עשתה המסכה בצפון (A.8.2) ובדרום (A.8.3), כיצד משתווים שני הקטבים לאחר מכן (A.8.4), האם שתי קבוצות הקוטר מסכימות (A.8.5), כיצד מתחברות הכיפות לרצועות (A.8.6), מה ניתן להסיק (A.8.7), ומה עדיין לא (A.8.8).

A.8.1 — לפני המסכה: שני הקטבים נראים שונים. בספירה ללא מסכה מתקבלים שני פרופילים שונים בבירור.

בקוטב הצפוני יש ריכוז פנימה. למכתשים שקוטרם ≥ 20 ק"מ, הצפיפות עולה מכ-189 למיליון קמ"ר בכיפה של 60° , לכ-198 ב- 45° , 227 ב- 30° , 270 ב- 20° , וכ-300 בכיפות הפנימיות של 15° ו- 10° . אין צורך לתאר את העלייה כמונוטונית עד נקודת הקוטב, שכן הערכים ב- 10° וב- 15° כמעט זהים — 298 ו-300 למיליון קמ"ר. אבל הפרופיל הכולל ברור: האזור הפנימי צפוף במידה משמעותית מן הכיפה הרחבה.

גם קבוצת ≥ 40 ק"מ מראה ריכוז פנימי בצפון. הצפיפות היא כ-63 למיליון קמ"ר בכיפה של 60° , עולה לכ-71 ב- 45° , 87 ב- 30° , ומגיעה לכ-100–108 למיליון קמ"ר בכיפות של 10° – 20° . ההתכנסות הצפונית אינה אפוא תכונה של סף 20 ק"מ בלבד.

בדרום מתקבל לפני המסכה פרופיל שונה. בקבוצת ≥ 20 ק"מ הצפיפות נשארת סביב 207–221 למיליון קמ"ר בין 15° ל- 60° , ורק בכיפה הפנימית של 10° היא עולה לכ-250. גם בקבוצת ≥ 40 ק"מ הפרופיל הדרומי רחב יותר: כ-72–82 למיליון קמ"ר בין 15° ל- 60° , לעומת כ-90 בכיפה של 10° .

כך שאילו נעצרה הבדיקה ב-A.6, המסקנה הטבעית הייתה ששני הקטבים נבדלים לא רק בעוצמת הצפיפות שלהם אלא גם בגאומטריה הפנימית שלהם: הצפון מראה ריכוז ברור לעבר האזור הפנימי, ואילו הדרום נראה שטוח ורחב יותר.

A.7 מראה שתיאור זה אינו שלם.

A.8.2 — המסכה כמעט אינה נוגעת בלב הפרופיל הצפוני. אחת התוצאות הברורות ביותר של A.7 היא שבשלוש הכיפות הצפוניות הפנימיות — 10° , 15° ו- 20° — המסכה אינה משנה לא את הספירה ולא את השטח ברמת החישוב שנעשה.

ב- ≥ 20 ק"מ נשארים: 298 למיליון קמ"ר ב- 10° ; 300 למיליון קמ"ר ב- 15° ; 270 למיליון קמ"ר ב- 20° . גם ב- ≥ 40 ק"מ נשארים אותם ערכים: כ-108, 101 ו-104 למיליון קמ"ר, בהתאמה.

כלומר, ההתכנסות הפנימית שנראתה בצפון ב-A.6 אינה נוצרת בידי האגנים והימות שהוצאו במסכה. בטווח 20° מן הקוטב הצפוני המסכה שבה השתמשנו אינה משנה את הפרופיל כלל: שום אגן של המסכה ושום ים אינם מגיעים קרוב כל כך לקוטב הצפוני, ולכן לא היה מה להוציא. הליבה הצפונית היא קרקע עתיקה שעליה הספירה הייתה נקייה מלכתחילה.

השפעת המסכה מתחילה בכיפות הרחבות יותר. בכיפה הצפונית של 30° , למשל, צפיפות ≥ 20 עולה מכ-227 לכ-233 למיליון קמ"ר — שינוי של כ-2.8%. בכיפה של 45° היא עולה מכ-198 לכ-232, וב- 60° מכ-189 לכ-235. עבור ≥ 40 ק"מ מתקבל אותו כיוון כללי: הכיפות הרחבות עולות לאחר המסכה, בעוד הכיפות הפנימיות נשארות ללא שינוי.

המסכה משנה אפוא את **הרקע הרחב** סביב האזור הקוטבי הצפוני הרבה יותר משהיא משנה את הליבה הפנימית שלו.

זוהי הבחנה חשובה. לפני המסכה, ההבדל בין 60° ל- 15° בצפון גדול: כ-189 לעומת 300 למיליון קמ"ר עבור ≥ 20 . לאחר המסכה, הכיפה הרחבה של 60° עולה לכ-235, בעוד הכיפה של 15° נשארת 300. כתוצאה מכך ההתכנסות פנימה עדיין קיימת, אבל המשרעת שלה קטנה יותר.

במילים אחרות: **המסכה אינה יוצרת את הריכוז הצפוני, אבל היא מראה שחלק מן הניגוד בין המרכז הקוטבי לסביבתו הרחבה נובע מן השטחים שהוצאו מחוץ לליבה.**

A.8.3 — בדרום המסכה משנה את התמונה באופן יסודי יותר. תגובת הקוטב הדרומי שונה.

כבר בכיפה של 10° המסכה מוציאה חלק ניכר מן השטח ומן האוכלוסייה. מספר מכתשי ≥ 20 יורד מ-72 ל-36, אבל השטח הזמין מצטמק די כדי שהצפיפות תעלה מכ-250 לכ-348 למיליון קמ"ר — עלייה של כ-39%.

השינוי חזק עוד יותר בכיפה של 15° . לפני המסכה נספרו בה 139 מכתשי ≥ 20 בצפיפות של כ-215 למיליון קמ"ר. לאחר המסכה נותרים 84 מכתשים על שטח של כ-0.275 מיליון קמ"ר, והצפיפות עולה לכ-305 למיליון קמ"ר — עלייה של כ-42%.

בקבוצת ≥ 40 ק"מ השינוי בכיפה זו גדול עוד יותר: הצפיפות עולה מכ-82 לכ-124 למיליון קמ"ר, שינוי של כ-51%.

גם בכיפה של 20° מתקבלת עלייה משמעותית: ≥ 20 עולה מכ-207 לכ-280 למיליון קמ"ר, ו- $40 \leq$ מכ-73 לכ-98. ככל שהכיפה מתרחבת, השפעת המסכה נחלשת. ב- 30° העלייה ב- ≥ 20 היא כ-17%; ב- 45° וב- 60° היא כ-11%–12%.

כך, בניגוד לצפון, שבו הליבה הפנימית כמעט אינה מושפעת מן המסכה, **בדרום המסכה פועלת כבר בתוך הכיפות הקטנות ביותר.** בטווח 20° מן הקוטב הדרומי הרכיב היחיד של המסכה הוא South Pole–Aitken (A.8.8), שרצפתו דלה במכתשים (A.10). הוצאתו גורעת חלק גדול מן השטח וחלק קטן יותר מן המכתשים, ולכן צפיפות מה שנשאר עולה.

זו בדיוק הסיבה שהיה צורך ב-A.7. את הפרופיל הדרומי השטוח יחסית של A.6 כבר אי אפשר לקרוא כאילו הוא בהכרח המבנה הבסיסי של אוכלוסיית המכתשים. חלק משמעותי מצורתו משתנה כשמוציאים את האגנים והימות מן המדידה ומתקנים בהתאם את השטח הזמין.

A.8.4 — לאחר המסכה שני הקטבים נעשים דומים יותר — אך לא זהים. כשמשווים את A.7 לבדה, מתקבלת תמונה שונה מזו של A.6.

ב- $20 \geq$ ק"מ, בכיפה של 15° , הצפון עומד על כ-300 למיליון קמ"ר והדרום על כ-305. בכיפה של 20° שני הקטבים קרובים: כ-270 בצפון וכ-280 בדרום. בכיפה של 10° הדרום גבוה יותר — כ-298 בצפון לעומת כ-348 בדרום — על 36 מכתשים דרומיים בלבד.

זהו שינוי יסודי לעומת הספירה ללא מסכה, שבה ב- 15° התקבלו כ-300 בצפון וכ-215 בלבד בדרום, וב- 20° כ-270 לעומת כ-207.

כלומר, חלק גדול מן האסימטריה בין צפון לדרום שנראתה בכיפות הפנימיות ללא מסכה אינו נשאר לאחר הבקרה על אגנים וימות.

התוצאה מקבילה למה שנמצא קודם בבדיקת הרצועות, אבל כאן היא מפורטת יותר מבחינה גאומטרית. A.3 הראתה שהרצועות 75° – 90° דרום ו- 75° – 90° צפון נעשות כמעט שוות לאחר המסכה. A.7 מראה שההתכנסות אינה מוגבלת לממוצע של רצועה שלמה: ב- $20 \geq$ ק"מ מתקבלת קרבה בין צפון לדרום גם בכיפות הפנימיות של 15° ו- 20° , בעוד בכיפה הקטנה ביותר, של 10° , הדרום נמצא מעל הצפון.

אין להסיק מכך, עם זאת, ששני הקטבים נעשו זהים בכל מדד.

בקבוצת $40 \geq$ ק"מ, למשל, בכיפה של 15° מתקבלים כ-101 למיליון קמ"ר בצפון וכ-124 בדרום; ב- 10° כ-108 בצפון וכ-135 בדרום; וב- 20° כ-104 בצפון וכ-98 בדרום. המספרים מאותו סדר גודל, אבל הפרטים אינם חופפים.

גם בכיפות הרחבות יותר נשארים הבדלים. אם להבדלים כאלה יש משמעות זו שאלה של אי-ודאות הספירה, והתשובה עליה ניתנת ב-D.4, שבו יחס הדרום לצפון של כל כיפה ניתן עם טווח ה-95% שלו. ב- 15° וב- $20^\circ \geq$ ק"מ הוא 1.02 (0.78–1.32): הטווח שבסוגריים הוא המקום שבו נמצא היחס האמיתי בביטחון של 95%, ומשום שהוא מכיל את 1, שני הקטבים שווים בגבולות הספירה. כך גם בכל כיפה ובשני הספים; הטווח הרחב ביותר, 0.77–1.74 ב- 10° , שייך לכיפה שבה 36 מכתשים דרומיים בלבד. המסקנה הנכונה אינה אפוא "המסכה הופכת את הקטבים לזהים", אלא:

המסכה מסירה חלק גדול מן הניגוד הגולמי בין הפרופילים הפנימיים של הצפון והדרום ומביאה אותם לטווחי צפיפות דומים הרבה יותר.

A.8.5 — שתי קבוצות הקוטר מספרות סיפור דומה, אך לא זהה. השימוש בשני ספי קוטר הוא בדיקה חשובה, משום שהוא בודק אם התמונה תלויה באופן חריג בקבוצת מכתשים אחת.

בצפון, גם $20 \geq$ וגם $40 \geq$ מראים לפני המסכה צפיפות גבוהה יותר בכיפות הפנימיות מאשר ברחבות. לאחר המסכה הליבה של 10° – 20° נשארת ללא שינוי בשתי הקבוצות, בעוד הצפיפות בכיפות הרחבות עולה.

בדרום, בשתי קבוצות הקוטר המסכה משנה במידה משמעותית את הכיפות הפנימיות. בכיפה של 15° , למשל, העלייה היא כ-42% ב- $20 \geq$ וכ-51% ב- $40 \geq$ (+42.0% ו-+50.7% בטבלה של A.7§; גרסה מוקדמת של משפט זה גרסה כ-33% ו-41%). בכיפה של 20° העלייה היא כ-35% בשני הספים (+35.2% ו-+34.7%; קודם נקרא כ-30%).

הכיוון הכללי אינו אפוא תוצאה ייחודית של בחירת סף 20 ק"מ.

עם זאת, אין לצפות לזהות מספרית מלאה בין שתי קבוצות הקוטר. מספר מכתשי $40 \geq$ קטן יותר, ולכן תנודות הספירה היחסיות גדולות יותר; בנוסף, אוכלוסיית הקטרים הגדולים אינה בהכרח מדגם פשוט של אוכלוסיית $20 \geq$. השימוש בשני הספים כאן הוא אפוא בדיקת עקביות של **צורת התוצאה**, ולא דרישה שהיחסים יהיו זהים.

יש, עם זאת, הבדל קבוע אחד בין שתי הקבוצות, ויש לו משמעות. ברוב הכיפות היחס לרצועת המשווה גבוה יותר עבור $40 \geq$ ק"מ מאשר עבור $20 \geq$ ק"מ: בכיפה הצפונית של 30° , 1.64 לעומת 1.36 לפני המסכה; בכיפה הדרומית של 15° לאחר המסכה, 2.32 לעומת 1.83. העודף הקוטבי עולה עם גודל המכתש. הספירה הנקיה מראה אותו דבר בצעדים עדינים יותר (D.2): כשהימות ו-South Pole–Aitken מוצאים משני הצדדים, היחס של הכיפות של 30° לחגורה $15^\circ < |\phi|$ הוא 1.09 למכתשים של 20–30 ק"מ ומטפס ל-1.53 למכתשים של 60–100 ק"מ. מה פירוש הדבר במודל: גודלו של מכתש הוא שעון גס — המכתשים הגדולים שייכים, בממוצע, לחלק המוקדם יותר של התיעוד — ומכתשים שנוצרו מוקדם יותר נוצרו על גוף פחוס יותר, ולכן עברו חלק גדול יותר מן ההתעגלות שבאה אחר כך, והתרכזו לעבר הקטבים במידה רבה יותר. סיבה שאינה תלויה במועד היווצרותו של כל מכתש הייתה נותנת בערך אותו יחס לכל גודל; יחס שגדל עם הגודל אומר שההתרכזות נמשכה בזמן שהאוכלוסייה עוד הלכה והצטברה — ככל שמכתש מוקדם יותר, כך קיבל ממנה יותר. הבדיקה של סדר זה נמצאת ב-D.1–D.2.

A.8.6 — מה מלמדת ההשוואה בין רצועות לכיפות. כעת ניתן לחבר את שתי רמות הניתוח של חלק A.

הרצועות ענו על השאלה הראשונה: **האם קווי הרוחב הקוטביים מראים צפיפות גבוהה, והאם היא נשארת לאחר הוצאת האגנים והימות?** התשובה הייתה חיובית. לאחר המסכה שתי הרצועות הסמוכות לקטבים מגיעות לצפיפות גבוהה ודומה.

הכיפות שאלו שאלה מדויקת יותר: כיצד מסודרת אותה צפיפות כשמתקרבים לקוטב עצמו?

לפני המסכה התקבלה תשובה אסימטרית: הצפון נראה מרוכז פנימה והדרום שטוח יותר.

לאחר המסכה התמונה משתנה. הליבה הצפונית נשארת כמעט בדיוק כפי שהייתה, בעוד הדרום משתנה במידה משמעותית. כתוצאה מכך הכיפות הפנימיות של שני הקטבים נעשות דומות הרבה יותר בצפיפותן, בייחוד בקבוצת $20 \geq \text{ק"מ}$.

יש כאן, אם כן, הבחנה בין שני סוגי מידע.

הצפיפות הגבוהה בקווי הרוחב הקוטביים היא תוצאה שנשארת לאחר המסכה.

לעומת זאת, חלק מן ההבדל הגאומטרי שנראה בתחילה בין צפון לדרום אינו נשאר לאחר המסכה.

זוהי הבחנה חשובה, משום שהיא מונעת מאיתנו להפוך תכונה של פני השטח כפי שנשתמרו היום לתכונה ראשונית של התופעה שאנו מנסים להסביר.

A.8.7 — מה ניתן להסיק בשלב זה. לאחר A.1–A.7 ניתן לנסח כמה מסקנות תצפיתיות מוגבלות וברורות.

ראשית, אוכלוסיית המכתשים אינה אחידה לפי קו הרוחב. הרצועות הקוטביות נמצאות בקצה הגבוה של פרופיל הצפיפות.

שנית, הצפיפות הקוטבית הגבוהה אינה נעלמת לאחר הוצאת 20 האגנים הגדולים והימות הנכללים במסכה.

שלישית, לאחר המסכה מתקבלות צפיפויות דומות בשני הקטבים, הן ברמת הרצועות והן בכיפות הפנימיות של $20 \geq \text{ק"מ}$.

רביעית, האסימטריה הבולטת בין צורת הפרופיל הצפוני לצורת הדרומי לפני המסכה אינה יציבה תחת בדיקת המסכה. בצפון הליבה כמעט אינה משתנה; בדרום היא משתנה מאוד.

חמישית, הכיוון הכללי מופיע הן ב- $20 \geq$ והן ב- $40 \geq \text{ק"מ}$, ולכן אינו נשען על סף קוטר יחיד.

מסקנות אלה עדיין אינן קובעות את המנגנון שיצר את הדפוס. הן מגדירות את התופעה שהמנגנון יצטרך להסביר.

A.8.8 — מה שעדיין איננו יודעים. המסכה היא בדיקת בקרה, ולא שחזור מלא של פני הירח הקדומים.

היא מוציאה קבוצה מוגדרת של אגנים גדולים ואת מצולעי הימות, אבל אינה מתקנת כל תהליך של חידוש פני שטח, אינה משחזרת מכתשים שנמחקו, ואינה מוכיחה שהשטח הנותר שימר בשלמות את אוכלוסייתו המקורית.

בנוסף, הכיפות הן מדידות מצטברות. הכיפה של 30° כוללת את אלה של 20° , 15° ו- 10° . שינוי בין שתי כיפות אינו שקול אפוא ישירות לצפיפות בטבעת שביניהן. אם נרצה בעתיד לבדוק היכן בדיוק מתרחש השינוי הרדיאלי, ניתן לערוך ניתוח טבעות נפרד. אין בו צורך כדי לבסס את התוצאה המצטברת המוצגת כאן.

גם אי-הוודאות של הספירה גדלה ככל שהכיפה קטנה. בכיפות הפנימיות, למשל, מספר מכתשי $40 \geq \text{קטן}$ בהרבה ממספר מכתשי $20 \geq$. לכן אין להשתמש בהבדלים קטנים בין 10° ל- 15° כהוכחה למבנה עדין בקנה מידה זה בלי מבחן סטטיסטי מתאים. הכיפות של 10° מכילות 86 מכתשים $20 \geq \text{ק"מ}$ בצפון ו-36 בדרום; הטווחים של D.4 מראים כמה רחבה אי-הוודאות בגודל זה.

לבסוף, העובדה שהמסכה משנה מאוד את הדרום אינה, כשלעצמה, הוכחה שכל השינוי נגרם בידי אגן יחיד. South Pole–Aitken הוא הרכיב הגדול והבולט ביותר של המסכה הדרומית, אבל המסכה המלאה כוללת גם אגנים נוספים. עם זאת, בטווח 20° מן הקוטב הדרומי SPA הוא הרכיב היחיד של המסכה: שם הספירות

והשטחים של המסכה המלאה ושל SPA לבדו חופפים. מבנה אוכלוסיית המכתשים בתוך SPA עצמו נבחן ב-A.10.

A.8.9 — סוף בדיקת הכיפות. בנקודה זו ניתן לסגור את השאלה שהובילה מן הרצועות אל הכיפות.

בדיקות הרצועות הראו שצפיפות המכתשים גבוהה בקווי הרוחב הקוטביים ושהתוצאה אינה נעלמת לאחר הוצאת האגנים הגדולים והימות. אבל רצועות רוחב אינן יכולות להראות כיצד מתפלגת צפיפות זו בתוך האזור הקוטבי עצמו. A.6 ו-A.7 מילאו פער זה בסדרה של כיפות קונצנטריות סביב כל אחד משני הקטבים, תחילה ללא מסכה ואחר כך עם אותה מסכה שבה נעשה שימוש בבדיקות הרצועות.

לפני המסכה התקבלה תמונה אסימטרית. בצפון נראה ריכוז ברור פנימה: בקבוצת $20 \geq$ ק"מ הצפיפות עלתה מכ-189 מכתשים למיליון קמ"ר בכיפה של 60° לכ-300 בכיפה של 15° , ונשארה כמעט באותה רמה בכיפה של 10° . גם בקבוצת $40 \geq$ ק"מ הראתה צפיפות גבוהה יותר בכיפות הפנימיות. בדרום, לעומת זאת, הפרופיל ללא מסכה היה שטוח הרבה יותר לאורך רוב טווח הרדיוסים, וצפיפות $20 \geq$ נשארה סביב 207–221 למיליון קמ"ר בין 15° ל- 60° , עם עלייה לכ-250 רק בכיפה של 10° .

אילו נעצרנו ב-A.6, ניתן היה להסיק ששני הקטבים מראים לא רק צפיפויות שונות אלא גם גאומטריות פנימיות שונות מן היסוד. A.7 מראה מדוע מסקנה זו הייתה מוקדמת מדי.

לאחר המסכה, הליבה הצפונית כמעט אינה משתנה. בכיפות של 10° , 15° ו- 20° מתקבלים אותם מספרי מכתשים, אותם שטחים ואותן צפיפויות שנמצאו ללא המסכה. ההתכנסות הפנימית בצפון אינה אפוא תוצאה של האגנים והימות הנכללים במסכה. המסכה מתחילה לפעול רק בכיפות הרחבות יותר, שם היא מעלה את הצפיפות המחושבת של השטח הנותר ומקטינה את הניגוד בין הליבה הצפונית לסביבתה הרחבה.

בדרום התגובה שונה מן היסוד. המסכה מגיעה כבר אל הכיפות הפנימיות ומשנה הן את השטח הזמין והן את הצפיפות המחושבת. בכיפה של 15° , למשל, צפיפות $20 \geq$ עולה מכ-215 לכ-305 למיליון קמ"ר, וצפיפות $40 \geq$ מכ-82 לכ-124 למיליון קמ"ר. בכיפה של 20° צפיפות $20 \geq$ עולה מכ-207 לכ-280 למיליון קמ"ר. העלייה אינה באה ממכתשים שנוספו; היא מתקבלת משום שהמסכה מוציאה מן הכיפות הדרומיות, באופן יחסי, יותר שטח ממכתשים.

כתוצאה מכך משתנה גם ההשוואה בין שני הקטבים. לפני המסכה, בכיפה של 15° , התקבלו כ-300 מכתשי $20 \geq$ למיליון קמ"ר בצפון לעומת כ-215 בדרום. לאחר המסכה מתקבלים כ-300 לעומת כ-305. בכיפה של 20° ההבדל, שעמד על כ-270 בצפון לעומת כ-207 בדרום, מצטמצם לאחר המסכה לכ-270 לעומת כ-280. בכיפה של 10° , הקטנה ביותר, הדרום נמצא מעל הצפון לאחר המסכה — כ-348 לעומת כ-298, על 36 מכתשים דרומיים.

התוצאה החשובה של בדיקת הכיפות אינה אפוא ששני הקטבים זהים, ואף לא שהפרופיל הדרומי הפך להעתק של הצפוני. התוצאה הצרה יותר היא שחלק גדול מן האסימטריה שנראתה בין הכיפות הפנימיות של שני הקטבים בספירה ללא מסכה **אינו יציב תחת בדיקת המסכה**. לאחר הוצאת האגנים והימות, הכיפות הפנימיות של הצפון והדרום מגיעות לטווחי צפיפות דומים הרבה יותר, בייחוד בקבוצת $20 \geq$ ק"מ.

תוצאה זו משלימה את מה שנמצא קודם ברצועות. ברמת הרצועות, המסכה הביאה את 75° – 90° דרום ואת 75° – 90° צפון לכ-305 ולכ-300 מכתשי $20 \geq$ למיליון קמ"ר. ברמת הכיפות, אותה התכנסות בין צפון לדרום מופיעה גם כשהמדידה מצטמצמת בהדרגה אל האזור הפנימי של הקוטב. שתי גאומטריות המדידה — רצועות וכיפות — אינן מודדות בדיוק את אותו הדבר, אבל לאחר המסכה הן מצביעות על אותו כיוון כללי: הצפיפות הגבוהה אינה תכונה של קוטב אחד בלבד.

עם זאת, יש לשמור על גבול ברור בין התוצאה להסבר. המסכה שבה נעשה כאן שימוש היא האיחוד של 20 אגנים גדולים ומצולעי הימות. South Pole–Aitken הוא הרכיב הגדול ביותר שמגיע עמוק אל האזור הקוטבי הדרומי, ולכן הגאומטריה שלו מספקת סיבה ברורה לכך שהמסכה פועלת בדרום יותר מבצפון. אבל A.7 אינה בדיקה של SPA לבדו. לכן אין לייחס בשלב זה את כל השינוי הדרומי ל-SPA לבדו בלי להפריד את תרומתו מתרומת שאר רכיבי המסכה. בטווח 20° מן הקוטב ההפרדה הזו כבר נעשתה, שכן שם SPA מוציאה את הימות ואת SPA במפורש ומשני הצדדים. (A.8.8); מעבר לכך, הספירה הנקייה של A.11 ו-D.1 מוציאה את הימות ואת SPA במפורש ומשני הצדדים.

מה שיש בידינו כעת, בסוף בדיקת הכיפות: עודף מכתשים קוטבי בשני הקטבים, צפוף לעבר כל קוטב, שווה בשני הקטבים בגבולות הספירה ברגע שאותה קרקע מוצאת משניהם, קיים בשני ספי הקוטר וגדול יותר עבור המכתשים הגדולים. זוהי התופעה ששאר המאמר בא להסביר.

A.9 ששת הצירים

השאלה של סעיף זה. סעיפים A.1–A.8 ספרו מכתשים לפי קו רוחב ולפי קו אורך, וסביב שני הקטבים. כל אחת מן הספירות האלה מביטה לאורך כיוון אחד בלבד. אבל לירח נעול יש שלושה צירים טבעיים, וכל אחד מהם הוא הציר של תהליך אחר. **ציר הסיבוב** עובר דרך שני הקטבים; כל מה שמסודר בידי הסיבוב, הפחיסות והרפייתת — התהליך שהמודל מציע להצטופפות בקטבים — מסודר סביב הציר הזה, קוטב מול משווה. **קו כדור הארץ** עובר מן הנקודה התת-ארצית, הנקודה הפונה אל כדור הארץ, אל הנקודה האנטי-ארצית בצד הרחוק; כל מה שמסודר בידי כדור הארץ עצמו — המגע עם גוף האם, הגאות שמותחת את הגוף לעבר כדור הארץ והרחק ממנו — מסודר סביב הציר הזה. **כיוון המסלול** עובר מן הנקודה המובילה, הפונה קדימה לאורך המסלול, אל הנקודה המאספת, הפונה אחורה; כל מה שמסודר בידי תנועת הירח בחלל — למשל פנ שאוסף יותר מן החומר שהוא פוגש — מסודר סביב הציר הזה. אם סופרים את צפיפות המכתשים בכיפות שווים סביב ששת הקצוות של שלושת הצירים האלה, סדר ששת המספרים מראה לאיזה ציר, או לאיזה צירוף של צירים, הדפוס שייך. זה המבחן של סעיף זה.

כיפות של 30° סביב שש הנקודות הראשיות — הנקודה התת-ארצית $(0^\circ, 0^\circ)$, הנקודה האנטי-ארצית $(0^\circ, 180^\circ)$, הנקודה המאספת $(0^\circ, 90^\circ E)$, הנקודה המובילה $(0^\circ, 90^\circ W)$ ושני הקטבים — לאחר הוצאת האגנים והימות (המסכה של A.3) נותנים את טבלה A.9. כיפה של 30° הוא האזור שבתוך 30° של קשת ממרכזו, כ-910 ק"מ על פני השטח; ששת הכיפות שווים בגודלם, ולכן צפיפויותיהם ניתנות להשוואה ישירה. המסכה היא זו של A.3: האגנים הגדולים ומצולעי הימות של LROC מוסרים יחד עם שטחם, והמכתשים נספרים במה שנשאר. עמודות הצפיפות והיחס צבועות מצהוב רך לערכים הנמוכים ועד אדום רך לגבוהים; הצבעים הם עזר קריאה בלבד.

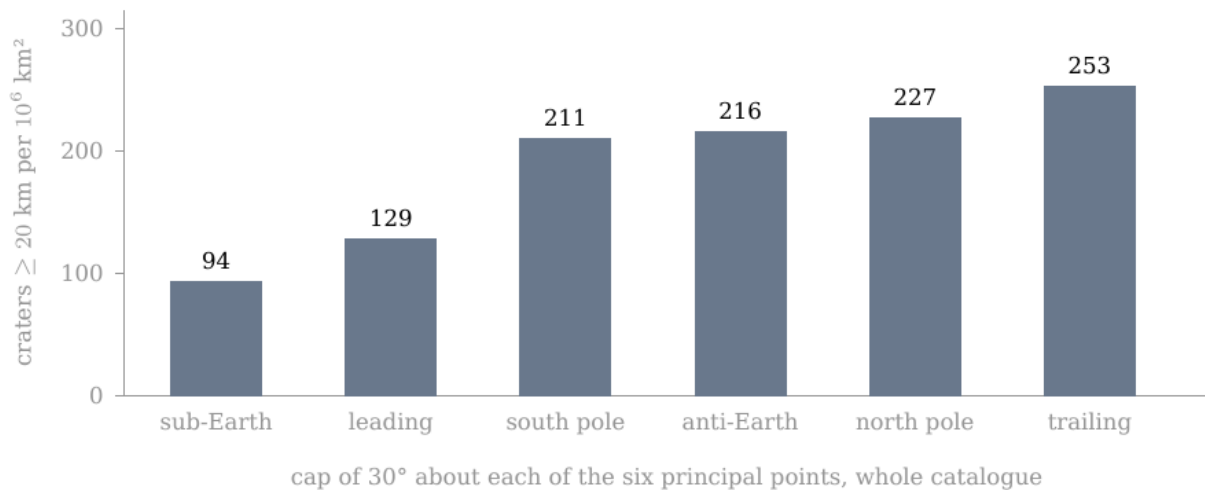
נקודה	מרכז	שטח שנותר, 10^6 קמ"ר	$N \geq 20$	צפיפות ≥ 20	יחס ≥ 20	שינוי ≥ 20	$N \geq 40$	צפיפות ≥ 40	יחס ≥ 40	שינוי ≥ 40
הנקודה התת-ארצית	$0^\circ, 0^\circ$	1.042	154	148	0.89	+57.8%	50	48	0.90	+50.6%
הנקודה המובילה	$0^\circ, 90^\circ$ מערב	1.765	308	174	1.05	+34.7%	107	61	1.14	+29.4%
הקוטב הדרומי	90° דרום	1.308	322	246	1.48	+16.7%	105	80	1.51	+10.3%
הנקודה האנטי-ארצית	$180^\circ, 0^\circ$	1.668	368	221	1.33	+2.3%	105	63	1.18	-8.6%

הקוטב הצפוני	90° צפון	2.399	560	233	1.40	+2.8%	213	89	1.67	+1.6%
הנקודה המאספת	90°, 0° מזרח	1.468	370	252	1.51	-0.3%	135	92	1.73	+9.2%

טבלה A.9: צפיפות המכתשים (מכתשים למיליון קמ"ר) בכיפות של 30° סביב שש הנקודות הראשיות, לאחר המסכה, למכתשים של 20 ק"מ ומעלה ושל 40 ק"מ ומעלה.

איך לקרוא את הטבלה: כל שורה היא כיפה של 30° סביב אחת משש הנקודות. בסמל הקטן שבעמודה הראשונה של הגרסה האנגלית, הקשת שמימין היא כדור הארץ, ולכן הנקודה התת-ארצית פונה ימינה; החץ שמשמאל הוא כיוון התנועה במסלול, ולכן הנקודה המובילה (90° מערב) נמצאת למטה, לכיוונו, והנקודה המאספת (90° מזרח) למעלה. הכיפה הדרומי משורטט בקו מקווקו. היחס הוא ביחס לרצועת המשווה של A.1, כמו בשאר הטבלאות. השינוי הוא ביחס לאותו כיפה בקטלוג השלם, שבו צפיפויות המכתשים של 20 ק"מ ומעלה הן 94 (התת-ארצית), 129 (המובילה), 211 (הקוטב הדרומי), 216 (האנטי-ארצית), 227 (הקוטב הצפוני) ו-253 (המאספת) — איור 7. השורות ממוינות מן הכיפה הדליל ביותר אל הצפוף ביותר; על הקורא להביט קודם בסדר השורות, ואחר כך בעמודת השינוי, שמראה כמה מערכו של כל כיפה נשאו הימות והאגנים שהוסרו ממנו. שינוי חיובי גדול (הנקודה התת-ארצית, +57.8%; הנקודה המובילה, +34.7%) פירושו שהשטח שהוסר היה דל במכתשים והוריד את הספירה הגולמית; שינוי קרוב לאפס (הנקודה המאספת, -0.3%) פירושו שהמסכה כמעט לא נגעה בצפיפות שם.

הסדר בקטלוג השלם. בקטלוג השלם הסדר הוא: הנקודה התת-ארצית, בצד של אזור המגע של מאמר 3 (מרכזו, קצה האגס, בכ-24° צפון 335° מזרח, 34° מן הנקודה התת-ארצית; A.9.2), הפן המוביל, הקטבים והצד הרחוק עם ראש הכיפה בנקודה האנטי-ארצית, והפן המאסף. אזור המגע הוא האזור בצד הקרוב שדרכו, במודל, נשאר הגוף מחובר לגוף האם עד השחרור; ראש הכיפה הוא הקצה הרחוק של הגוף העולה, החלק שפנה הרחק מכדור הארץ. הקטבים עומדים עם הצד הרחוק, מעל הטבעת שהם שייכים אליה — כלומר הם צפופים יותר מטבעת קווי האורך המשוונית העוברת דרך הנקודות התת-ארצית, המובילה והמאספת, ועומדים ברמת הצד הרחוק. כשמוציאים רק את קרקעית Orientale, הנקודה המובילה עולה מ-129 ל-162 (C.3): חלק גדול מן הערך הנמוך של הכיפה המוביל הוא הקרקעית הצעירה של אגן אחד.



איור 7. ששת הצירים (A.9): צפיפות המכתשים של 20 ק"מ ומעלה בכיפות של 30° סביב הנקודות התת-ארצית, המובילה, הקוטב הדרומי, האנטי-ארצית, הקוטב הצפוני והמאספת. הקטבים עומדים עם הצד הרחוק; הנקודה התת-ארצית היא הדלילה ביותר. העמודות הן הקטלוג השלם, לפני המסכה; בקריאה משמאל לימין הן עולות מן הנקודה שפנתה אל כדור הארץ אל הפן המאסף. (בשרטוט: ציר אנכי — "מכתשים ≥ 20 ק"מ למיליון קמ"ר"; העמודות משמאל לימין — תת-ארצית 94, מובילה 129, קוטב דרומי 211, אנטי-ארצית 216, קוטב צפוני 227, מאספת 253; כיתוב תחתון — "כיפה של 30° סביב כל אחת משש הנקודות הראשיות, הקטלוג השלם").

הסדר לאחר המסכה. התנגדות מוכנה מראש: הצד הקרוב מחזיק את רוב הימות, הימות הם מישורים צעירים דלים במכתשים, ולכן המינימום התת-ארצי יכול להיות לא יותר מן הימות כפי שהם נראים מזווית אחרת. המסכה עונה עליה. לאחר המסכה הסדר נשמר: הנקודה התת-ארצית נשארת הדלילה ביותר (148), הנקודה המובילה אחריה (174), הקטבים והצד הרחוק מעליה (221–246), והנקודה המאספת הגבוהה ביותר (252). לכן הימות אינם יוצרים את המינימום התת-ארצי. הכיפה התת-ארצי מרוויח הכי הרבה מן המסכה (+57.8%), כצפוי מן הכיפה שמחזיק את רוב שטח הימות, ועדיין נשאר בתחתית הסדר.

מה הסדר אומר. התוצאה אינה מסודרת לפי ציר אחד בלבד. סביב ציר הסיבוב, הקטבים עומדים מעל הנקודות המשווניות הפונות אל כדור הארץ ואל המסלול, כפי שההצטופפות בקטבים של A.1–A.8 דורשת. סביב קו כדור הארץ, הקצה התת-ארצי הוא הדליל מכל השישה, והקצה האנטי-ארצי עומד עם הקטבים: שני קצות קו כדור הארץ שונים זה מזה, כפי שראוי שיהיו אם הקצה הקרוב היה המגע עם גוף האם והקצה הרחוק היה הראש החופשי. המודל קורא את הדפוס כצורתו של הגוף המחובר: פחוס בידי הסיבוב שלו, ובנוסף מתוח לאורך קו כדור הארץ בין הכבידה של כדור הארץ למשיכה הצנטריפוגלית של הקורטציה — צורה תלת-צירית, ארוכה לכיוון כדור הארץ (a), בינונית לאורך המסלול (b) וקצרה דרך הקטבים (c). "הצדדים" כאן הם הנקודה המובילה והנקודה המאספת, השוכנות על המשווה בזווית ישרה לקו כדור הארץ. עם המסכה, הקטבים עומדים פי 1.12 מעל הצדדים (ממוצע שני הקטבים מול ממוצע שני הצדדים), פי 1.62 מעל הנקודה התת-ארצית לבדה, פי 1.09 מעל הנקודה האנטי-ארצית לבדה, ופי 1.30 מעל הממוצע של שני קצות קו כדור הארץ. הצורה הגאותית החופשית של C.2 נותנת אותו סדר (1.66, 1.56 ו-1.06 לקטבים מול התת-ארצית, לצדדים מול התת-ארצית ולקטבים מול הצדדים), כהמחשה.

הצורה, כפי שהיא נקראת מששת הכיפות. את ששת הכיפות אפשר לקרוא כצורה. לצורה a:b:c ההתעגלות של C.3 קובעת את הציפוף בכל נקודה, והמיצוע שלו על אותן כיפות ממוסכות נותן את יחס הקטבים לצדדים ואת יחס הקטבים לקצוות שהצורה הזו הייתה משאירה. בהתאמה לשני הקצוות של קו כדור הארץ, ה-1.12 וה-1.30 שנמדדו במכתשים של 20 ק"מ ומעלה נותנים את הצורה **1.37 : 1.15 : 1.0**. אותה צורה, ממוצעת על הכיפות והחגורה הנקיות של D.1, חוזה יחס של **1.21** בין הקטבים לחגורה, מול ה-1.19–1.20 שנמדדו (D.1): שני

אזורים שונים של פני השטח, נקראים דרך צורה אחת, בלי שום כיוון בנייהם. משתמשים בשני הקצוות משום שהקצה התת-ארצי לבדו מגזים את חלק הביצה של הצורה: דיסקת המגע של הצד הקרוב דילדלה אותו מסיבה שאינה הצורה (A.9.2). המכתשים הגדולים, שנוצרו קרוב יותר לשיא הפחיסות, קוראים צורה פחוסה יותר: ל-60–100 ק"מ ול-60–300 ק"מ ששת הכיפות נותנות כ-2.1 : 1.2 : 1 וכ-2.0 : 1.3 : 1, רופפות משום שכל כיפה מכילה רק 13–68 מכתשים כאלה, והצורות שמתאימות גם לששת הכיפות וגם לחגורה הנקייה בתוך פיזור הספירה מתרכזות סביב כ-1.8 : 1.4 : 1 — צורת השיא של C.1. הטבלאות של ההתאמה הזו מובאות ב-C.3. מאחורי הקלעים: הקריאה הראשונה של הסדר הזה השוותה את הקטבים לנקודה התת-ארצית לבדה; כשהתברר שדיסקת המגע מדלדלת את הקצה הזה, ההתאמה נעשתה לשני הקצוות ומוצעה דרך אותה מסכה כמו הספירות.

הציר השלישי, כיוון המסלול, נדון בהמשך, משום ששני קצותיו אינם מתנהגים באותו אופן.

A.9.1 — הצד המאסף הוא הצד הצפוף. שני קצות כיוון המסלול שונים זה מזה בכל מדד ששימש בחלק A, ותמיד באותו כיוון. הטבלה מרכזת את ארבעת המדדים — שתי צורות אזור, כל אחת לפני המסכה ואחריה — כדי שהקורא יראה שהסימן לעולם אינו מתהפך, ואילו גודל ההבדל משתנה.

מדד, מכתשים ≥ 20 ק"מ למיליון קמ"ר	מאסף, 90° מזרח	מוביל, 90° מערב	יחס
כיפה של 30° , הקטלוג השלם	253	129	1.96
כיפה של 30° , לאחר המסכה	252	174	1.45
רצועה של 30° , הקטלוג השלם (A.2)	237	154	1.54
רצועה של 30° , לאחר המסכה (A.4)	219	204	1.07

טבלה: הצד המאסף מול הצד המוביל בארבעה מדדים.

ב- $40 \leq$ ק"מ הכיפות נותנים 84 לעומת 47 לפני המסכה, ו-92 לעומת 61 אחריה. העודף אינו איסוף של חומר בידי הפן המוביל במסלול: הפן המוביל הוא הדליל מן השניים. גוף הנע דרך זרם של חומר היה אוסף יותר על הפן הקדמי שלו, כמו שמשה קדמית שאוספת יותר חרקים מן החלון האחורי; הירח מראה את ההפך, ולכן העודף אינו מן הסוג הזה. המודל נותן לו שתי סיבות, המפורטות ב-A.9.2–A.9.4: הפתחים של הצד המאסף עצמו, וחומר שפיגר אחרי הסיבוב ונחת מאחור, בצד המאסף. הוא גם אינו תכונה של קו האורך כולו: לאחר המסכה, הרצועות מקוטב לקוטב נבדלות זו מזו בכסטיית תקן ספירה אחת בלבד (A.5.3), ואילו הכיפות סביב שתי הנקודות עדיין נבדלים בכחמש. סטיית תקן של ספירה היא הפיזור הצפוי בספירה מן המקרה בלבד; הבדל של יחידה אחת כזו נמצא בתחום המקרה, הבדל של חמש — לא. רצועה של 30° בקו האורך משתרעת מקוטב לקוטב ומערבבת את האזור שסביב הנקודה עם קווי רוחב גבוהים הרחוקים ממנה; כיפה של 30° מחזיק רק את האזור שבתוך כ-910 ק"מ מן הנקודה. העודף שורד בכיפה ודועך ברצועה, ולכן העודף נמצא באזור שסביב 90° מזרח.

A.9.2 — הימות שוכנים באותו צד. אם העודף שייך לאזור שסביב 90° מזרח, השאלה הבאה היא מה יש באזור הזה שאין באזור שסביב 90° מערב. מצולעי הימות של LROC נחתכו במדויק עם אותם כיפות של 30° , כך ששטח הימות ומספר יחידות הימות נמדדים בדיוק באזורים שבהם נספרו המכתשים:

מצולעי הימות של LROC בכיפה של 30°	סביב 90° מזרח	סביב 90° מערב	יחס
יחידות ים (מצולעים) בכיפה	132	63	2.10
שטח הימות בכיפה, קמ"ר	205,830	279,470	0.74
מתוכם Oceanus Procellarum	—	192,134	
שטח הימות של הצד עצמו, בלי Procellarum, קמ"ר	205,830	87,336	2.36

טבלה: הימות בכיפות של 30° סביב 90° מזרח וסביב 90° מערב.

סביב 90° מזרח שוכנים Mare Smythii, Mare Marginis, Mare Undarum ו-Mare Spumans, עם יחידות קטנות יותר סביב Joliot, Hubble, Lomonosov ו-Artamonov; סביב 90° מערב עומדים כמה מבנים של מערכת Lacus Veris ו-Mare Orientale — Grimaldi, Orientale. הכיפה שסביב 90° מערב מגיע עד 60° מערב, ושם נכנס לתוכו השוליים המערביים של Oceanus Procellarum: 192,134 קמ"ר, יותר משני שלישים משטח המסכה בכיפה הזה. Procellarum הוא מישור בזלת ולא ים — קרום שהותך בחום הכללי של כדור הארץ, בלי כיפת הזנה — והוא שוכן באזור המגע ולא בפן המוביל; הוא נספר בנפרד. נקודת החיבור של המודל הוצבה תחילה ב-23° צפון, 320° מזרח (מאמר 11, C.2§); הייחוס כעת הוא מרכז אזור המגע של 3,000 ק"מ, 24.1° צפון 335.2° מזרח (מאמר 3, B.4§), כאשר Mare Imbrium (37.6° צפון 340.0° מזרח), הפתח העיקרי שדרכו נכנסה ההזנה מכדור הארץ אל הירח, בתוכו. Procellarum שוכן בצדו המערבי של אזור המגע הזה, ושטחו בכיפה המוביל שייך לאזור המגע ולא לפן המוביל. בלעדיו, הצד המאסף נושא פי 2.36 משטח הימות של הצד המוביל, ופי 2.10 יחידות ים. אם מניחים בצד גם את יחידות הצד הקרוב שנכנסות לכיפה המאסף, Mare Crisium ומישור הבזלת Fecunditatis, היחס הוא 170,839 ל-87,336, כלומר 1.96 — אותו יחס כמו יחס צפיפויות המכתשים באותם כיפות. הקרבה בין שני המספרים היא תצפית, לא חוק. השטחים ומספרי היחידות בפסקה זו הם של פוליגוני הימות של LROC, מסכה שכוללת את מישורי הבזלת יחד עם הימות (A.3); הם ניתנים כפי שנמדדו על המסכה הזו. מה שהטבלה קובעת הוא הכיוון: הצד שיש בו יותר מכתשים הוא גם הצד שיש בו יותר ימות משלו.

A.9.3 — הימות כמקורות: זריקה, חזרה, נחיתה, והקרקעית החמה. מדוע הצד שיש בו יותר ימות יחזיק יותר מכתשים, כשהימות עצמם דלים במכתשים? במודל, הימות הם הפתחים שדרכם עלה חומר עמוק ונזרק (מאמר 3; מאמר 11, C.3§) — כל ים הוא פתח מעל כיפת הזנה — והחומר שנזרק חזר ונחת על הקליפה במהירות שבה עזב: 2 עד 5 ק"מ/ש', ונחת 50 עד כ-1,000 ק"מ מן הפתח שלו על הקליפה, ופחות מכך מאוחר יותר, על הגוף הצפוף והמעוגל (מאמר 6, A.2§). מאמר 6 מראה מדוע מהירות הנחיתה שווה למהירות הזריקה: חומר שנפל בחזרה לגובה שממנו יצא שומר על האנרגיה שלו ועל התנע הזוויתי שלו, וחוזר במהירות שבה נזרק. לכן פתח פועל על תיעוד המכתשים בשני כיוונים בבת אחת. הוא שולח חומר חוזר שנוחת על פני השטח שסביבו ויוצר שם מכתשים, בעוד הקרקעית שלו עצמו נשארת חמה: המכתשים שנוצרו על קרקעית הפתח הומסו, והקרקעית קפאה רק לאחר הניתוק. התיעוד הנראה היום הוא המאזן בין השניים:

$$N_{\text{obs}}(x) = N_{\text{background}}(x) + N_{\text{return}}(x) - N_{\text{erased}}(x)$$

במילים: מספר המכתשים הנצפה במקום x הוא הרקע שכל חלק של פני השטח קיבל, ועוד המכתשים שנוצרו שם בידי חומר חוזר מפתחים סמוכים, פחות המכתשים שהומסו על הקרקעית החמה של פתח. מחוץ לימות האיבר האחרון קטן והשני יכול להיות גדול; בתוכם, האיבר האחרון שולט. המסכה של A.3 אינה משחזרת את מה שנמחק: היא מסירה את המכתשים שבתוך הימות יחד עם שטחם, ומודדת את מה שנשאר מחוצה להם. השפעתה אינה סימטרית: סביב 90° מזרח הצפיפות כמעט אינה משתנה (מ-253 ל-252), סביב 90° מערב היא

עולה (מ-129 ל-174). סביב 90° מערב השטח שהוסר, בעיקר Procellarum וקרקעית Orientale, היה דל במכתשים, והסרתו מעלה את הצפיפות של מה שנשאר; סביב 90° מזרח, השטח שמחוץ לימות כבר היה צפוף כמו הכיפה כולו. לכן מה שהמסכה משאירה סביב 90° מזרח הוא האוכלוסייה שמחוץ לימות — אזור הנחיתה של החומר החוזר.

A.9.4 — מה נובע מכך. מקור החומר הנזרק ומקום הנחיתה אינם אותו מקום, והמודל קובע את המרחק ביניהם: המעופים של מאמר 6 נושאים את החומר עד כ-1,000 ק"מ על הקליפה, ופחות על הירח המעוגל — קנה המידה של הכיפות של 30° (כ-910 ק"מ), ולא קנה המידה של רצועה המשתרעת מקוטב לקוטב. זה מה ששני קני המידה מראים יחד: העודף שורד את המסכה בכיפות שסביב 90° מזרח, ודועך ברצועות. אזור בגודל של אזור הנחיתה מראה את העודף; אזור ארוך ממנו פי כמה מדלל אותו בקרקע שהחומר החוזר לא הגיע אליה. המודל קורא את צפיפות המכתשים הגבוהה יותר של הצד המאסף, ראשית, כתיעוד של הפתחים הרבים יותר שבו:

יותר מכתשים סביב הימות $\rightarrow$ יותר חומר נזרק חוזר $\rightarrow$ יותר ימות (פתחים)

השרשרת נקראת משמאל לימין: יותר פתחים בצד אחד פירושם יותר חומר שנזרק מעלה שם, ויותר חומר שנופל בחזרה בטווח הפתחים פירושו יותר מכתשים בקרקע שסביבם, מחוץ לימות עצמם. הקשר משטח הימות אל המסה הנזרקת, ומן המסה הנזרקת אל מכתשים מעל 20 ק"מ, הוא דרישה של המודל; החישוב שיספק אותו — היסטוריית הזריקה של כל פתח, המעופים ותפוקת המכתשים — הוא זה המפורט ב-E.3 של מאמר זה, עם גאומטריית הנחיתה של החומר החוזר במאמר 6, חלק K.

הסיבה השנייה היא הסיבוב עצמו. בזמן שהגוף היה מחובר הוא הסתובב עם כדור הארץ, וחומר שנזרק מעלה מפתחים במקומות אחרים עליו פיגר אחרי הסיבוב וירד מאחור, בצד המאסף (מאמר 6). כדור שנזרק ישר למעלה מרצפת קרוסלה מסתובבת נוחת מאחורי הנקודה שממנה עזב. לכן הצד המאסף קיבל, נוסף על החומר החוזר מן הפתחים שלו, גם חומר שפיגר ונחת מאחור. שתי הסיבות פועלות באותו כיוון, וגודלה של כל אחת מהן הוא חלק מן החישוב המפורט ב-E.3.

מה A.9 ביסט. ששת הכיפות מציבים את הנקודה התת-ארצית בתחתית, את הקטבים עם הצד הרחוק, ואת הנקודה המאספת בראש, והסדר הזה נשמר לאחר הסרת הימות והאגנים. ציר הסיבוב וקו כדור הארץ יחד נותנים את הסדר של חמש משש הנקודות, כפי שדורשת צורתו של גוף מחובר, פחוס בידי הסיבוב שלו ומתוח לאורך קו כדור הארץ, ובקריאה כצורה הם נותנים את הצורה 1.37 : 1.15 : 1 לכל המכתשים של 20 ק"מ ומעלה, שחוצה את העודף הקוטבי הנקי (1.21 מול 1.19–1.20); ההבדל בין שני קצות כיוון המסלול נמצא סביב 90° מזרח, בקנה המידה של מעופי החזרה, בצד שנושא יותר פתחים משלו ושקיבל את החומר שפיגר אחרי הסיבוב.

A.10 צפיפות המכתשים בתוך South Pole–Aitken

סעיפים A.1–A.9 בחנו את פיזור המכתשים לפי קו רוחב, לפי קו אורך, בכיפות הקוטב וסביב ששת הצירים. במהלך המבחן של הקוטב הדרומי התברר ש-South Pole–Aitken אינו רק רכיב של המסכה: פיזור המכתשים בתוכו אינו אחיד בעצמו. לכן A.10 בוחן את SPA כעצם מרחבי בפני עצמו, אך רק במידה הנדרשת כדי לסגור את שאלת המכתשים של מאמר 7. ההסבר למוצא המבנה מועבר למאמר 8.

מדוע SPA נבחן בנפרד. South Pole–Aitken הוא האגן הגדול ביותר על הירח, כ-2,400 ק"מ לרוחבו, והוא שוכן בצד הרחוק ומגיע לעבר הקוטב הדרומי. הוא נוגע ישירות בשאלת הקטבים: רבע מכיפות הקוטב (24%) נמצא בתוכו, רובו בדרום (A.11). במסכה הוא מוסר כאזור אחד, ובקטלוג השלם הוא נכנס כאזור אחד; בכל מקרה, מספר אחד מייצג את האגן כולו. אילו היה האגן אחיד, מספר אחד היה מספיק. מבחני הקוטב הדרומי הראו שאינו אחיד, ואזור שאינו אחיד אינו יכול להיות מתואר בהגינות בידי הממוצע שלו: מרכז דל ושוליים רגילים, בממוצע יחד, יראו כאגן דל במידה בינונית בכל מקום. לכן האגן נמדד כאן ממרכזו החוצה.

A.10.1 — הגדרת המבחן. מרכז SPA נלקח כאן כמרכז האגן ששימש בחישובי המסכה, בקירוב 53° דרום, 191° מזרח, בקוטר של 2,400 ק"מ. הקוטר הזה מתאים לרדיוס זוויתי של 39.57° : מחצית הקוטר, 1,200 ק"מ, מחולקת ברדיוס הירח, נותנת את הזווית במרכז הירח בין מרכז האגן לשפתו. במקום למצע את האגן כולו למספר אחד, המרחק ממרכז SPA מחולק לטבעות: 0° – 10° , 10° – 20° , 20° – 30° , ו- 30° – 39.57° עד השפה; מעבר לשפה, שתי טבעות ביקורת, 39.57° – 50° ו- 50° – 60° . הטבעות דומות לטבעות של מטרה המשורטטות סביב מרכז האגן; שתי הטבעות החיצוניות משמשות להשוואה — הקרקע הסמוכה לאגן שלא הייתה שייכת לו.

הטבעות אינן מקוננות זו בזו: כל שורה היא אזור נפרד. השטח הוא של טבעת כדורית, $A = 2\pi R^2 (\cos \theta_1 - \cos \theta_2)$ עם $R = 1737.4$ ק"מ, והמכתשים משויכים לפי מיקום מרכזם. במילים: שטח הרצועה שבין המרחקים הזוויתיים θ_1 ו- θ_2 ממרכז האגן, על כדור ברדיוס הירח R ; הגורם $\cos \theta_1 - \cos \theta_2$ מביא בחשבון את העקמומיות, כך שטבעת של 10° הרחוקה מן המרכז גדולה בשטחה מטבעת של 10° הקרובה אליו. המבחן נעשה בנפרד למכתשים של 20 ק"מ ומעלה ושל 40 ק"מ ומעלה.

הייחוס של היחס מקומי ל-A.10: $1.00 =$ הצפיפות בטבעת שמיד מחוץ לשפת SPA, 39.57° – 50° . הייחוס המקומי הזה נבחר משום שהשאלה של A.10 היא אם חלקים בתוך SPA דלים או עשירים ביחס לסביבה הסמוכה לאגן; הוא אינו מחליף את הייחוס המשווני ששימש בטבלאות של A.7–A.1. הקרקע שמיד מחוץ לשפה שוכנת כמעט באותם קווי רוחב ובאותו צד של הירח כמו האגן, ולכן השוואה אליה מסירה את השפעות הקוטב והצד הרחוק של A.9–A.1, ומבודדת את מה ששייך לאגן עצמו.

טבלה A.10 — צפיפות המכתשים בטבעות סביב מרכז SPA. עמודות הצפיפות והיחס צבועות מצהוב רך לערכים הנמוכים ועד אדום רך לגבוהים. לכל סף קוטר יש סקלה משלו. הצבעים הם עזר קריאה בלבד ולא מבחן מובהקות.

low



high

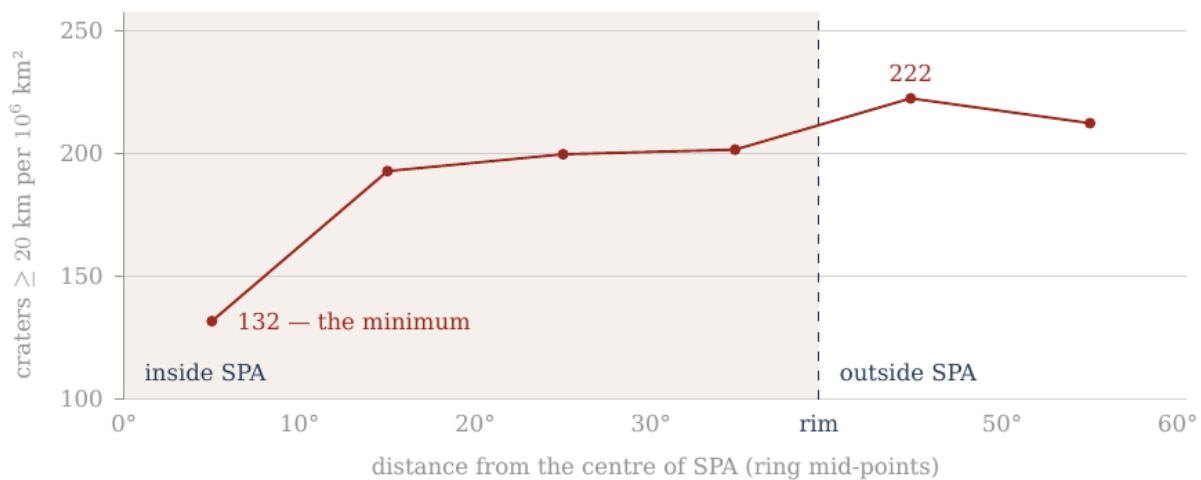
מקרא הצבעים: מצהוב ("נמוך") ועד אדום ("גבוה").

מכתשים ≥ 40 ק"מ			מכתשים ≥ 20 ק"מ			שטח, 10^6 קמ"ר	מיקום	מרחק ממרכז SPA
יחס	צפיפות	N	יחס	צפיפות	N			
0.69	52	15	0.59	132	38	0.288	בתוך SPA	0° – 10°
0.90	68	58	0.87	193	165	0.856	בתוך SPA	10° – 20°
0.93	70	98	0.90	200	279	1.397	בתוך SPA	20° – 30°
0.95	71	129	0.91	202	364	1.806	בתוך SPA, עד השפה	30° – 39.57°
שפת 39.57° • SPA • קוטר 2,400 ק"מ								
1.00	75	183	1.00	222	540	2.428	מיד מחוץ לשפה	39.57° – 50°
0.96	72	196	0.95	212	575	2.708	מחוץ ל-SPA	50° – 60°

טבלה A.10: צפיפות המכתשים (מכתשים למיליון קמ"ר) בשש טבעות נפרדות סביב מרכז SPA.

איך לקרוא את הטבלה: כל שורה היא טבעת נפרדת סביב מרכז SPA; בסמל הקטן שבעמודה הראשונה של הגרסה האנגלית, המעגל המקווקו הוא שפת האגן והטבעת המוצללת היא האזור של השורה. הצפיפות היא

מספר המכתשים מחולק בשטח הטבעת במיליוני קמ"ר. היחס הוא ביחס לסביבה: צפיפות הטבעת חלקי צפיפות הטבעת שמיד מחוץ לשפה, 39.57° – 50° (1.00 מודגש), מחושב מן הספירות ומן השטחים הלא מעוגלים. קראו את עמודת הצפיפות מלמעלה למטה: תא בהיר אחד למעלה, המרכז, ומתחתיו עמודה של ערכים כמעט שווים. השורה הצהובה היחידה היא הממצא של סעיף זה.



איור 8. צפיפות המכתשים של 20 ק"מ ומעלה בשש טבעות נפרדות סביב מרכז South Pole–Aitken (A.10). האזור המרכזי הוא המינימום של הפרופיל; הצפיפות עולה כבר בטבעת 10° – 20° , ומתקרבת לזו של הסביבה לקראת השפה. החלק המוצלל הוא פנים האגן; הקו המקווקו הוא שפתו. (בשרטוט: ציר אנכי — "מכתשים ≥ 20 ק"מ למיליון קמ"ר"; ציר אופקי — "מרחק ממרכז SPA (נקודות האמצע של הטבעות)", עם סימונים ב- 0° , 10° , 20° , 30° , 50° , 60° ו"שפה"; כיתובים — "בתוך SPA", "מחוץ ל-SPA"; על העקומה האדומה — "132 — המינימום" ו-222).

A.10.2 — האזור המרכזי הוא המינימום של הפרופיל. התוצאה הבולטת ביותר נמצאת באזור 0° – 10° ממרכז SPA. שטחו כ-0.288 מיליון קמ"ר — כ-288,000 קמ"ר — ולכן המונח "מרכז" מתייחס כאן לאזור גאוגרפי רחב ולא לנקודה; זו דיסקה ברדיוס 10° סביב מרכז האגן. באזור הזה נספרו רק 38 מכתשים של 20 ק"מ ומעלה, צפיפות של כ-132 למיליון קמ"ר.

מחוץ לאזור המרכזי הצפיפות עולה בחדות: לכ-193 ב- 10° – 20° , לכ-200 ב- 20° – 30° , ולכ-202 בין 30° לשפת האגן. מיד מחוץ לשפה היא מגיעה לכ-222 למיליון קמ"ר. לכן צפיפות המכתשים של 20 ק"מ ומעלה באזור המרכזי היא רק כ-0.59 מזו של הסביבה שמיד מחוץ ל-SPA — חוסר יחסי של כ-41%. הפרופיל הוא מדרגה ולא מדרון: טבעת נמוכה אחת במרכז, ואחריה, מ- 10° והלאה, רמה קרובה לזו של הסביבה.

A.10.3 — סף 40 הק"מ כמבחן עקביות. מכתשים של 40 ק"מ ומעלה מראים את אותו כיוון כללי. הצפיפות באזור 0° – 10° היא כ-52 למיליון קמ"ר, לעומת כ-68–71 בחלקים החיצוניים של SPA וכ-75 מיד מחוץ לשפה. היחס בין המרכז לסביבה הקרובה הוא כ-0.69.

אולם באזור המרכזי נספרו רק 15 מכתשים של 40 ק"מ ומעלה, ולכן אי-הוודאות היחסית של הספירה גדולה יותר מאשר בקבוצת 20 הק"מ. הפיזור המקרי של ספירה גדל כשורש הריבועי של הספירה, ולכן גודלו היחסי קטן ככל שהספירה גדלה: חמישה עשר מכתשים נושאים אי-ודאות יחסית גדולה יותר משלושים ושמונה. לכן קבוצת 40 הק"מ משמשת כאן מבחן עקביות לכיוון התוצאה, ואילו הקביעה הכמותית העיקרית נשענת על קבוצת 20 הק"מ.

A.10.4 — SPA בכללותו אינו מתואר נכון במילה "חוסר". הטבלה מראה שהחוסר אינו אחיד על פני האגן. כבר בטבעת 10° – 20° צפיפות המכתשים של 20 ק"מ ומעלה עולה לכ-193, ובשתי הטבעות הבאות בתוך SPA היא קרובה ל-200. מן המינימום המרכזי לא נובע ש-South Pole–Aitken כולו דל במכתשים. הדבר חשוב

לספירה הנקייה של SPA: A.11 מוסר שם משום שמרכזו דל, והסרתו מוציאה את המרכז הדל יחד עם הטבעות החיצוניות שאינן דלות.

הממצא הצר והישר הוא אחר: בתוך SPA יש אזור מרכזי רחב שבו צפיפות המכתשים נמוכה בבירור מאשר בחלקים החיצוניים של האגן ובסביבה שמיד מחוץ לשפתו.

גבול המסקנה

A.10 משתמש כאן בחלוקה רדיאלית מעגלית המבוססת על קוטר SPA ששימש במסכה. הוא אינו קובע שהאזור הדל עצמו עגול, אינו מגדיר את גבולו הפיזיקלי המדויק, ואינו מסביר את מוצאו. שאלות הגאומטריה המפורטת והסיבה הפיזיקלית נמצאות מעבר למטרתו של מאמר 7.

A.10.5 — נקודת המגע עם מאמר 8. הממצא הזה עלה מתוך הבדיקה של מכתשי הקטבים במאמר 7, ולכן הוא שייך לתיעוד התצפיתי של המאמר הנוכחי. אבל עצם קיומו פותח שאלה חדשה: מדוע האזור המרכזי של South Pole–Aitken מראה צפיפות מכתשים נמוכה יותר מן האזורים החיצוניים של האגן?

מאמר 7 אינו מנסה לענות על השאלה הזאת. תפקידו מסתיים כאן: הוא מזהה את התופעה ומכמת אותה. הבדיקה עוברת אל **מאמר 8 (South Pole–Aitken)**, שבו SPA עצמו הופך לעצם המחקר המרכזי. שם תיבחן הגאומטריה המפורטת של האזור הדל — האליפטיות והאסימטריה של האגן, מיקום מינימום הצפיפות, הקשרים האנטיפודיים האפשריים, והמנגנונים הפיזיקליים שיכולים להסביר את חידת SPA.

חלוקת התפקידים בין המאמרים

מאמר 7 מסתיים בקביעה התצפיתית: **האזור המרכזי הרחב של SPA הוא המינימום של פרופיל צפיפות המכתשים הרדיאלי שנבדק.**

מאמר 8 מתחיל מן השאלה שהקביעה הזאת יוצרת: **מה יצר את המבנה החריג הזה של South Pole–Aitken?**

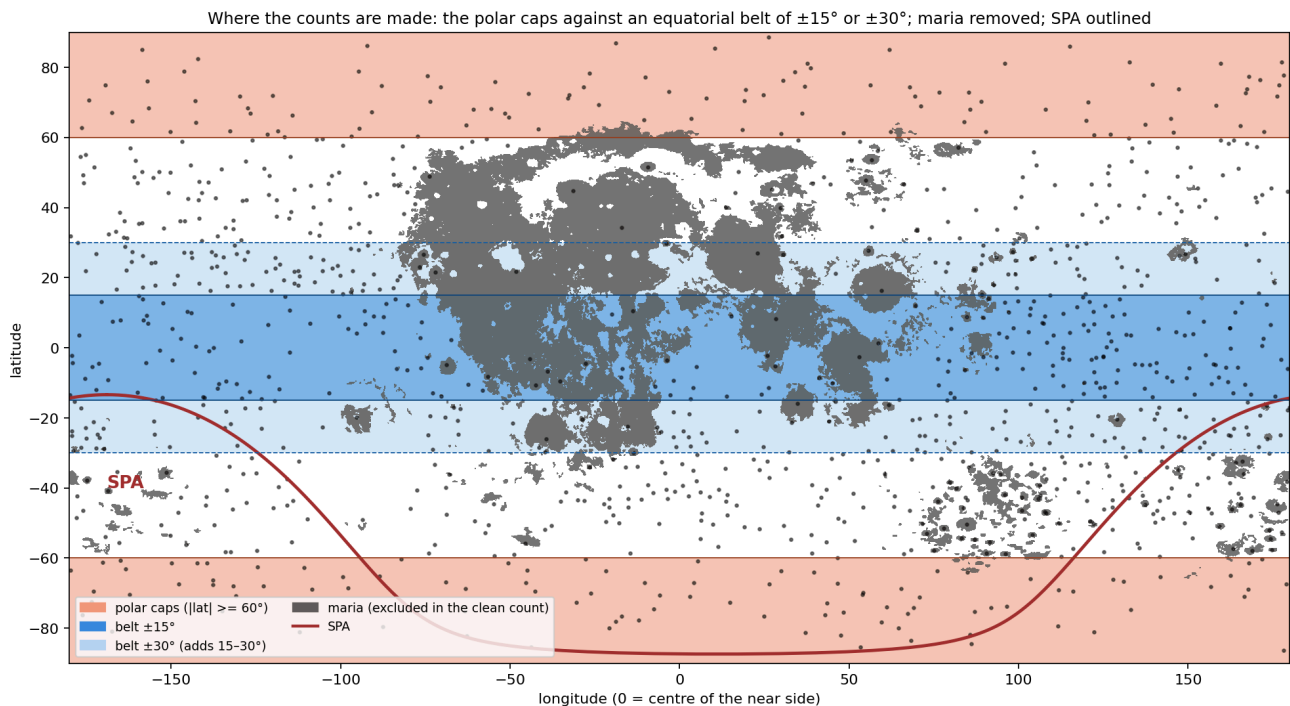
המספרים בטבלה מבוססים על קטלוג Robbins ששימש לאורך כל חלק A. גבול 10° הוא גבול ניתוחי של הטבעת הפנימית, ואינו מוצג כגבול פיזיקלי מוכח של אזור החוסר.

A.11 כיצד נעשו הספירות, ומה גבולותיהן

סעיף זה מרכז במקום אחד את הכללים שמאחורי כל ספירה של חלק A ושמאחורי היחס העיקרי של המאמר: היכן נמצאים אזורי ההשוואה, מה מוסר מהם ומדוע, ומה ספירת מכתשים יכולה ואינה יכולה לומר. קורא שרוצה לבדוק מספר במאמר הזה צריך להיות מסוגל לעשות זאת מן הכללים האלה.

היכן נעשות הספירות. המבחן משווה בין שני אזורים: **כיפות הקוטב** (קו רוחב 60° ומעלה, צפון ודרום) ו**חגורה משונית** (קו רוחב בתוך 15° מן המשווה). חגורה של 15° היא הצרה ביותר שעדיין מחזיקה מספיק מכתשים; היא נותנת את הניגוד החד ביותר בין קוטב למשווה, ששם השפעת ההתעגלות היא הגדולה ביותר. במודל, ההצטופפות גדלה עם קו הרוחב: הקטבים הם הנקודות שבהן נפגשו כל קווי האורך כשהפחיסות הרפתה (C.3), והמשווה הוא הרחוק מהם ביותר, ולכן הניגוד הנקי ביותר הוא בין שני קצות הטווח הזה. חגורה רחבה יותר של 30° נותנת כמעט את אותה תוצאה כוללת (1.12 לעומת 1.11) אבל מדללת את הניגוד, משום שהיא כוללת קווי רוחב שבהם ההשפעה בינונית. ההסכמה בין שתי החגורות מראה שהתוצאה אינה תלויה בבחירת החגורה.

ספירה נקייה. שני סוגי שטח אינם שייכים להשוואה. **הימות** הם מישורי לבה צעירים הדלים במכתשים, והם שוכנים בעיקר ליד המשווה: אם נספרים, הם מורידים את הצפיפות המשוונית ומנפחים את היחס. הם מוסרים משני הצדדים — 22% מן החגורה, 1% מן הכיפות. **South Pole–Aitken** מחק את מכתשי מרכזו, ורבע מכיפות הקוטב (24%) נמצא בתוכו, רובו בדרום: אם נספר, הוא מוריד את הצפיפות הקוטבית. גם הוא מוסר. שתי ההסרות פועלות בכיוונים מנוגדים — הימות היו מטים לטובת הקטבים, SPA היה מטה לטובת המשווה — והסרת שתיהן, משני צדי ההשוואה, משאירה השוואה של דומה לדומה: קרקע ותיקה מחוץ לימות ומחוץ ל-SPA, בקטבים ובמשווה. מאחורי הקלעים: הגרסה הראשונה של המאמר השווה ספירות שכללו את הימות, מה שהעלה את היחס ל-1.32; הספירה הנקייה מסירה אותם משני הצדדים, והמסקנה נשענת עליה (D.1–D.2).



איור 9. היכן נעשות הספירות: כיפות הקוטב (כתום) מול החגורה המשוונית של $\pm 15^\circ$ (כחול כהה); חגורת ה- $\pm 30^\circ$ בכחול בהיר (להשוואה). הימות (אפור) מוסרים משני הצדדים; South Pole–Aitken (קו מתאר אדום) מוסר מן הספירה הנקייה. נקודות: מכתשים של 60 ק"מ ומעלה.

איור 9 מראה את האזורים על מפת הירח: שני הכיפות הכתומים, החגורה הכחולה הכהה, הימות האפורים שהוצאו משניהם, וקו המתאר האדום של SPA בדרום. הימות נופלים בעיקר בחגורה, ו-SPA בעיקר בכיפה הדרומי, ולכן כל אחד מהם, אילו נספר, היה דוחף את היחס בכיוון משלו.

חמישה דברים תוחמים את מה שהספירות יכולות לומר. **ראשית**, התיעוד מצטבר: כל מכתש מאז שהקליפה החלה לאסוף את התיעוד שלה על כדור הארץ נמצא בו, וכל חתימה של תקופה אחת היא תוספת על רקע, או חוסר במקום שבו משטח מאוחר יותר מחק אותו. ספירה היום רואה את סכום כל התקופות, לא אחת מהן; העודף הקוטבי נקרא כדפוס שנוסף על הסכום הזה. **שנית**, סף הקוטר חשוב: מתחת ל-40 ק"מ שלמות הקטלוג משתנה עם סוג השטח, ונכנסים מכתשים משניים; סדרת 20 הק"מ משמשת למספרים, סדרת 40 הק"מ לסימון; מתחת ל-20 ק"מ, ששם שולטים הרסס והמכתשים המשניים ופני השטח מתקרבים לרוויה, לא נעשית השוואה. מכתשים משניים הם מכתשים שנוצרו בידי שברים שנזרקו ממכתש גדול יותר; רוויה היא המצב שבו מכתשים חדשים מוחקים ישנים באותו קצב שבו הם נוצרים, כך שהספירה מפסיקה לגדול. **שלישית**, התאורה: בקטבים השמש עומדת על האופק וכל מכתש קטן מטיל צל, כך שהעין רואה שם הרבה יותר מכתשים מאשר במשווה; הקטלוג נבנה ממפות ומטופוגרפיה ואינו שותף להטיה הזאת, ולכן משתמשים בספירות ולא בתמונות. צילום של הקוטב נראה מכותש יותר ממה שהוא, כמו שדה בשקיעה שמראה כל תלם; הקטלוג מודד את הקרקע, לא את

הצללים שלה. **רביעית**, הרקע: הסדר של מאמר 11 סביב הציר התת-ארצי נוכח מתחת לכל מה שמדווח כאן, והעודף הקוטבי נמדד ביחס אליו, לא במקומו — ששת הצירים של A.9 מראים את שניהם בבת אחת, את המינימום התת-ארצי ואת הקטבים מעל הטבעת המשוונית. **חמישית**, מערך הספירה: כל צפיפות במאמר הזה לקוחה מן הקטלוג הגאומטרי של Robbins, שהוא אחיד על פני הירח כולו; מפות גאולוגיות, שהורכבו ממפות מוקדמות ברמות פירוט לא שוות, צפופות פי כמה בצד הקרוב מאשר ברחוק ואינן משמשות לספירות (D.3). ספירה יכולה להיות מושווית רק לספירה אחרת שנעשתה באותה שיטה; קטלוג אחיד הוא מה שהופך את הקוטב והמשווה, את הצד הקרוב והרחוק, לברי השוואה.

לאחר A.1–A.10 אפשר אפוא לסגור את השלב התיאורי של חלק A. תחילה זוהתה הצפיפות הגבוהה בקווי הרוחב הקוטביים; אחר כך היא הופרדה מן האסימטריה לפי קו אורך; מבחן המסכה הראה שהיא אינה נעלמת כשמוציאים את האגנים והימות; מבחן הכיפות הראה כיצד המבנה הקוטבי עצמו משתנה — או נשאר — תחת אותה ביקורת; ששת הצירים הראו שהדפוס מסודר לפי צירי הירח ולא לפי קו רוחב בלבד; ובתוך South Pole–Aitken נמדד מינימום מרכזי, שהועבר למאמר 8.

מכאן והלאה השאלה משתנה.

עד כה שאלנו בעיקר **מה נמצא על פני הירח, היכן הוא נמצא, ואילו חלקים של הדפוס נשארים לאחר ביקורות גאומטריות ומרחביות.**

השלב הבא חייב לשאול **מה יכול ליצור דפוס כזה.**

כל הסבר שייבחן מכאן והלאה יצטרך לעמוד לפחות באילוצים שהתצפית קבעה כאן: צפיפות גבוהה בשני האזורים הקוטביים; הופעתה בשני ספי הקוטר שנבדקו; הישרדותה לאחר הוצאת האגנים והימות; ההבדל בין תגובת הצפון לתגובת הדרום למסכה; התכנסות הצפיפויות בכיפות הפנימיים של שני הקטבים לאחר ההוצאה; וסדר ששת הצירים, עם הנקודה התת-ארצית כדלילה ביותר.

במילים אחרות, A.1–A.10 הגדירו את **התופעה שיש להסביר**. מכאן אנו עוברים מתיאור אל מבחני ההסבר: אילו מנגנונים יכולים ליצור את המבנה שנמדד, אילו אינם יכולים, ואילו מהם משאירים ניבויים שאפשר לבחון באופן בלתי תלוי.

חלק B — מה ניסינו לפני התשובה

חלק A מדד היכן המכתשים של הירח צפופים: בשני הקטבים, יותר מאשר בקו המשווה, ועל טבעת שלמה של פני השטח ולא בנקודה אחת. חלק C יציג את הסיבה שאנו מציעים. החלק הזה עומד ביניהם. לפני התשובה, אנו מציגים את שש הפרשנויות שבחנו ודחינו בדרך אליה. גם הקורא יחשוב עליהן, והסיבה שכל אחת מהן נכשלת היא שהובילה אותנו לתשובה; כשרואים את שש הכישלונות יחד, הם משאירים מקום לסוג אחד בלבד של סיבה. כל פרשנות נבחנת מול אותן ארבע שאלות, והתשובות נלקחות מן הספירות של חלק A:

1. **סימן.** האם הפרשנות הופכת את הקטבים לצפופים יותר מקו המשווה, או לדלילים יותר?
2. **גודל.** אם הסימן נכון, האם היא מגיעה ליחס שנמדד — 1.32 בספירה הגולמית, 0.05 ± 1.20 בספירה הנקייה, ועולה עם גודל המכתש (D.1–D.2)?
3. **צורה.** האם היא מציבה את העודף במקום שבו הספירות מציבות אותו: על הציר, בשני הקטבים באותה מידה, ועל הטבעת של A.9 ולא בנקודה אחת?
4. **המסכה.** האם העודף שורד את הסרת האגנים והימות, כפי שהוא שורד בספירות?

שני מונחים חוזרים לאורך החלק. **הספירה הגולמית** משתמשת בכל מכתש בקטלוג; **הספירה הנקייה** מסירה תחילה, בשני צדי ההשוואה באותה מידה, את המשטחים שתיעוד המכתשים שלהם אופס או נשלט בידי אירוע יחיד — הימות, האגנים הגדולים ו-South Pole–Aitken — כך שהקוטב וקו המשווה מושווים על אותו סוג של קרקע. הסרת המשטחים האלה היא מה שאנו מכנים **המסכה** (A.3). היחס הוא מספר המכתשים ליחידת שטח ליד הקטבים, חלקי אותו מספר ליד קו המשווה: 1.00 פירושו שאין הבדל, ו-1.20 פירושו שעל אותו שטח נושאים הקטבים 20% יותר מכתשים.

פרשנות שנכשלת בשאלה הראשונה נכשלת לחלוטין: סיבה שמדללת את הקטבים אינה יכולה להסביר מדוע הם צפופים. פרשנות שעוברת את הראשונה ונכשלת באחרות עדיין יכולה להיות חלק מן התיאור, ובמקום שבו היא כזו, אנו שומרים אותה. ארבע השאלות מסודרות מן המבחן הגס ביותר אל העדין ביותר, כך שרוב הפרשנויות מוכרעות מוקדם.

B.1 שימור על רמות עתיקות

הפרשנות. הקטבים הם שטח רמות עתיק ללא ימות — מישורי הבזלת הכהים שהציפו חלק גדול מהצד הקרוב ומחקו את מה שהיה מתחתם. במקום שבו דבר לא הוצף, המכתשים נשארים. לפי פרשנות זו הקטבים צפופים משום שהם עתיקים ולא נגעו בהם, ולא משום שמשהו אסף לשם מכתשים. זה ההסבר הראשון שמדען פלנטרי פונה אליו, משום שצפיפות המכתשים היא המדד המקובל לגיל של משטח.

מה היא צופה. הצפיפות צריכה לעקוב אחר הגיל ואחר מידת השימור של השטח: שווה על כל רמה עתיקה שלא הוצפה, ונמוכה רק במקום שבו יש ים או אגן צעיר. היא אינה צופה מרכז: רמה עתיקה היא אחידה. במילים פשוטות, אילו השימור היה כל הסיפור, קוטב היה נראה כמו כל מרחב אחר של רמה עתיקה באותו גיל, ומפת צפיפות המכתשים הייתה מראה רמות ובורות, לא שיא.

מה הספירות אומרות. השימור הוא ממשי, והוא מסדר את הירח בקנה המידה הגדול ביותר: באזורי החשיפה של מאמר 11, הצד הרחוק נושא 219 מכתשים ל- 10^6 קמ"ר, חגורת השוליים 164 ודיסקת המגע 99. (יחידה של 10^6 קמ"ר, מיליון קילומטרים רבועים, היא ריבוע שצלעו כ-1,000 ק"מ; האזורים הם החלקים של הירח שפנו אל כדור הארץ, עמדו בשוליו או פנו הרחק ממנו בשלב החיבור.) אבל שלוש ספירות של חלק A חורגות ממנו.

- **העודף שורד את המסכה.** המסכה של A.3 מסירה בדיוק את מה שהשימור נשען עליו — האגנים והימות. מה שנשאר הוא רמה בשני צדי ההשוואה. אילו השימור היה הסיבה כולה, היחס היה יורד ל-1.00 עם הסרת המשטח המוצף; הוא יורד מ-1.32 ל-1.11, ועומד על 1.20 לאחר שמוסר גם South Pole–Aitken — הוא אינו מגיע ל-1, והוא עולה עם גודל המכתש עד 1.53 (D.1–D.2). זהו המבחן המכריע, משום שהוא משווה רמה לרמה: כל הבדל שנשאר אינו יכול להיות ההבדל בין קרקע מוצפת לקרקע שלא הוצפה.
- **הרמה העתיקה ביותר אינה הצפופה ביותר.** כתר הצד הרחוק, סביב הנקודה הנגדית לכדור הארץ, הוא המשטח העתיק ביותר במודל וזה שהימות נגעו בו הכי מעט. לאחר המסכה הוא נושא 221 מכתשים ל- 10^6 קמ"ר, לעומת 233 ו-246 בשתי הכיפות הקוטביות (A.9). הקטבים עומדים מעל הרמה העתיקה ביותר, ולא בשורה אחת איתה. אילו הגיל והשימור היו קובעים את הצפיפות, הכתר היה צריך להוביל; הוא אינו מוביל.
- **לקוטב הצפוני יש מרכז.** סביב הקוטב הצפוני, שבו שום אגן ושום ים אינם מגיעים למרחק 20° ממנו, הצפיפות עולה מ-189 מ- 60° ל-300 בכיפה של 15° (A.6). (כיפה של x° היא האזור העגול שבמרחק x מעלות מן הקוטב; כיפה קטנה יותר מתמקדת קרוב יותר לקוטב עצמו.) רמה עתיקה ואחידה אינה עולה לעבר נקודה. הקוטב הצפוני הוא המקום הנקי ביותר לראות זאת, משום שאין שם דבר שצריך להסתיר במסכה.

הכרעה. השימור עובר את מבחן הסימן. הסדר בין הצד הקרוב לצד הרחוק עצמו הוא סדר של גאומטריית המגע — אזורי המגע על קצה האגס (מאמר 3) — ושל הנחיתות הקשות ביותר, בצד הרחוק (מאמר 6, I.1§), ולא של שימור. השימור נכשל במבחן המסכה ובמבחן הצורה. אנו שומרים אותו רק כסיבה לכך שהימות והאגנים הצעירים נמוכים, ולא כסיבת העודף הקוטבי. הרמות שבצד הקרוב מדרום ל-Tycho, 302, בתוך 15° , הן תזכורת נוספת לכך שהצפיפות על שטח עתיק אינה נקבעת בגיל בלבד. מה שהשימור משאיר ללא הסבר הוא בדיוק נושא המאמר הזה: עודף שנשאר כשמשווים רמה לרמה, ושיש לו מרכז על ציר הסיבוב.

B.2 פחיסות סיבובית בזמן החיבור

הפרשנות. גוף רך שמסתובב מהר נפחס — רחב בקו המשווה, נמוך בקטבים — כמו בצק שמסובבים באוויר. במודל, הירח, בזמן שהיה מחובר, הסתובב עם כדור הארץ פעם בכחמש וחצי שעות, מהר מספיק כדי להיפחס במידה ניכרת (C.1). המחשבה הראשונה היא שהפחיסות לחצה את הקטבים יחד וקירבה את המכתשים שלהם זה לזה.

מה היא צופה. הגאומטריה הפוכה. ניקח משטח שכבר נושא מכתשים באופן אחיד, ונפחוס את הגוף ב**נפח קבוע** לספרואיד שיחס הצירים שלו a/c . (ספרואיד הוא צורתו של כדור שנלחץ באופן שווה מלמעלה ומלמטה; a הוא הרדיוס המשווני שלו ו- c הרדיוס הקוטבי, כך ש- $a/c = 1$ הוא כדור וערכים גדולים יותר פחוסים יותר. "נפח קבוע" פירושו שחומר אינו מתווסף ואינו מוסר, אלא רק משנה צורה.) המשטח הקוטבי נמתח בשני הכיוונים שבמישורו; המשטח המשווני נמתח לאורך קו המשווה ומתקצר לאורך קו האורך. ליחידת שטח, המכתשים מתדללים בקוטב ולא בקו המשווה, ויחס הצפיפויות מדויק:

$$\frac{\rho_{\text{pole}}}{\rho_{\text{equator}}} = \frac{c}{a}$$

כאן ρ מציין את מספר המכתשים ליחידת שטח, ולא את צפיפות החומר. המשוואה אומרת שהפחיסות מחלקת את צפיפות המכתשים הקוטבית, ביחס לקו המשווה, ביחס הצירים: ככל שהגוף פחוס יותר, קטביו דלילים יותר. זהו ההופכי של היחס שההתעגלות נותנת ב-C.3. עבור קצבי הסיבוב והצפיפויות של C.1, $a/c = 1.20$, מאוחר בהתעגלות (2,600 ק"ג/מ"ק, 5.77 שעות) ו-1.69 בשיא הפחיסות (1,300 ק"ג/מ"ק, 5.5 שעות), כך שהפחיסות הייתה משאירה את הקטבים ב-0.83 וב-0.59 מקו המשווה — 17% ו-41% פחות מכתשים ליחידת שטח בקטבים. (עד השחרור הגוף היה עגול, הקליפה שלו קשיחה, ו- a/c לכל היותר 1.04; מאמר 2, B.7§).

מה הספירות אומרות. הקטבים עומדים על 1.32 מקו המשווה בספירה הגולמית ועל 1.20 בספירה הנקייה. הסימן שגוי: פחיסות של משטח מכותש הופכת את הקטבים לדלילים יותר, והספירות מראות אותם צפופים יותר.

הכרעה. נכשלת בסימן. לחצו כדור רך מלמעלה ומלמטה: החלק העליון שלו אינו מתכווץ, הוא מתפרס, ונקודות שצוירו עליו מתרחקות זו מזו. מה שהפרשנות מבינה נכון הוא הגאומטריה, כשקוראים אותה בכיוון ההפוך: משטח שנמתח בקטבים ואחר כך משוחרר — מתכווץ בקטבים. זה C.3. מאחורי הקלעים, כאן השתנתה השיטה: יצאנו לחשב כמה הפחיסות תצופף את הקטבים, מצאנו שהיא דווקא מדללת אותם, ומאז חיפשנו את התהליך שמבטל פחיסות ולא את זה שיוצר אותה.

B.3 הציר הקוטבי שקוצר בידי הגאות — אפקט רוש

הפרשנות. בזמן שהירח היה מחובר הוא נמתח לאורך הקו המחבר אותו לכדור הארץ בין שתי משיכות מנוגדות: הכבידה של כדור הארץ משכה את הצד הקרוב שלו פנימה, לעבר כדור הארץ, והאפקט הצנטריפוגלי של הסיבוב בקורטציה משך את הגוף החוצה. החלק הקרוב שלו הוחזק על קצה האגס. (אפקט רוש הוא השם למתיחה של גוף הנמצא קרוב לגוף גדול ממנו בהרבה, בידי ההפרש בין המשיכות עליו.) הנפח שלו השתנה מעט, ולכן מה שנמתח לאורך הקו הזה בא משני הצירים האחרים; במערכת המסתובבת עם כדור הארץ, האיבר הצנטריפוגלי מחזיר את הציר שבכיוון התנועה, והקיצור נופל בעיקר על הציר הקוטבי. הקטבים נמשכו זה לעבר זה: אולי המכתשים שלהם נמשכו יחד איתם.

מה היא צופה. הצורה הנוזלית החופשית ב-2,600 ק"ג/מ"ק מחושבת ב-C.2: $a:b:c = 1:0.637:0.601$. כאן a מכון אל כדור הארץ, b בכיוון התנועה ו- c לאורך הקטבים; הצורה ארוכה בכיוון כדור הארץ וקצרה בקטבים, בערך ביצה המונחת לאורך הקו אל כדור הארץ. כשמחילים את המתיחה לצורה הזאת על משטח שכבר נושא מכתשים באופן אחיד, היא משנה את הצפיפות בכל נקודה פי ההופכי של הגורמים של C.3:

נקודה	מתיחה לצורת רוש	התעגלות חזרה לכדור (C.3)
קוטב	$\times 0.83$	$\times 1.21$
הנקודה המובילה והנקודה הנגררת	$\times 0.88$	$\times 1.14$
הנקודה הפונה לכדור הארץ	$\times 1.38$	$\times 0.73$

טבלה: השינוי בצפיפות המכתשים בשלוש נקודות של פני השטח — במתיחה לצורת רוש ובהתעגלות חזרה לכדור.

את הטבלה קוראים לרוחבה: כל שורה היא נקודה אחת של פני השטח, העמודה האמצעית אומרת מה המתיחה לצורת הגאות עושה לצפיפות המכתשים שבה, והעמודה הימנית — מה החזרה לכדור עושה. שתי העמודות הן הופכיות זו לזו: מה שהמתיחה מדללת, ההתעגלות מצופפת באותו גורם, ולהפך. ציר קוטבי שקוצר מפרס את המשטח שמעליו, בדיוק כמו ב-B.2: הקוטב הוא הנקודה המתוחה ביותר בצורה, וקצות הקו אל כדור הארץ — המתוחים פחות מכולן. קצות הציר המתוח — החלק הקרוב, המוחזק על קצה האגס, והקצה הרחוק — הם המקום שבו המשטח מתקבץ והמכתשים עומדים קרוב יותר זה לזה.

מה הספירות אומרות. הקטבים צפופים, והנקודה הפונה לכדור הארץ היא הדלילה ביותר מבין שש הנקודות (94: A.9, ו-148 לאחר המסכה). המתיחה לצורה צופה את ההפך בשתייהן.

הכרעה. נכשלת בסימן כמנגנון ציפוף. האפקט עצמו ממשי ונשמר: הוא הצורה של C.2, וההתעגלות מתוכה היא התשובה. אפקט רוש קובע את גודל המתיחה; ההתעגלות, ולא המתיחה, היא שמזיזה את המכתשים. כשקוראים את העמודה הימנית במקום האמצעית, אותה טבלה כבר מראה את הדפוס של הספירות: הקטבים הגבוהים ביותר, הצדדים אחריהם, והנקודה הפונה לכדור הארץ הנמוכה ביותר.

B.4 כבידה חזקה יותר בקוטב

הפרשנות. בגוף פחוס, הקוטב קרוב יותר למרכז והכבידה האפקטיבית שם גדולה יותר — אין בקוטב איבר צנטריפוגלי. (הכבידה האפקטיבית היא המשיכה של מסת הגוף פחות הדחיפה החוצה שחש כל דבר המסתובב עמו; בקוטב, על הציר, דבר אינו מסתובב סביב, ולכן אין דחיפה החוצה.) אולי הכבידה החזקה יותר משכה חומר פני שטח לעבר הקוטב.

מה היא צופה. הכבידה מושכת למטה, לא הצידה. כדי שחומר ינוע לאורך פני השטח לעבר הקוטב, הקוטב חייב להיות נמוך — קרקעית עמק בפוטנציאל האפקטיבי. (הפוטנציאל האפקטיבי הוא האנרגיה לקילוגרם של עמידה בנקודה מסוימת, כשמביאים בחשבון גם את הכבידה וגם את הסיבוב; חומר על פני שטח נע מפוטנציאל גבוה לנמוך, כמו מים שזורמים במורד.) בגוף המחובר, המסתובב עם כדור הארץ, המצב הפוך. במערכת המסתובבת עם הגוף, הפוטנציאל האפקטיבי בקו המשווה נמוך מזה שבקוטב ב- $\frac{1}{2}\Omega^2 R^2$, כאשר Ω הוא קצב הסיבוב ו- R הרדיוס: זוהי אנרגיית התנועה הנוספת שיש לנקודה על קו המשווה וחסרה לקוטב. סמוך לשחרור (יממה של 5.77 שעות, הסיבוב מאוחר בהתעגלות), לגוף במסת הירח בצפיפות 2,600 ק"ג/מ"ק (רדיוס של כ-1,890 ק"מ):

$$\frac{1}{2}\Omega^2 R^2 \approx 1.6 \times 10^5 \text{ J kg}^{-1}, \quad \frac{\frac{1}{2}\Omega^2 R^2}{g} \approx 120 \text{ km},$$

עם $g \approx 1.37 \text{ מ"ש}^2$ בפני השטח (C.7). המספר הראשון הוא ההפרש בפוטנציאל; חלוקתו בכבידת פני השטח g הופכת אותו לגובה — הגובה שצריך לטפס כדי לצבור אותה אנרגיה. על משטח שעוד לא נפחס עד למשטח שווה-הפוטנציאל שלו, הקוטב עומד כ-120 ק"מ "מעל" קו המשווה במובן הזה: זו הנקודה בעלת הפוטנציאל הגבוה ביותר, ראש גבעה, וחומר רופף מחליק ממנה הלאה, לעבר קו המשווה. (משטח שווה-פוטנציאל הוא משטח שהפוטנציאל בו שווה בכל מקום, כמו פני אגם שקט; גוף שהת"צ בצורת שיווי המשקל שלו — פני השטח שלו מונחים על משטח כזה.) זוהי הפחיסות של B.2, ולא ציפוף.

מה הספירות אומרות. העודף נמצא בקטבים. בזמן שהגוף הסתובב, הכבידה והסיבוב יחד הרחיקו ממנו חומר.

הכרעה. נכשלת כמנגנון צידי כל עוד הגוף מחובר ומסתובב. היא נשמרת במקומה הנכון. הכבידה של הגוף עצמו מחזיקה אותו שלם מגבול רוש הקשיח (כ-13,000 ק"מ ב-1,300 ק"ג/מ"ק) והלאה; ברגע שמאוחר בשלב החיבור מרכז המסה שלו עבר את קו הקורוציה והגוף כבר אינו לחוץ על הבסיס שלו, הקוטב של הגוף הפחוס קרוב יותר למרכז מקו המשווה שלו, הקוטב נעשה הנקודה הנמוכה ביותר של הפוטנציאל, ואותה כבידה מניעה את פני השטח לעברו — המנוע של ההתעגלות (C.4). (גבול רוש הקשיח הוא המרחק מכדור הארץ שמעבר לו הכבידה של הגוף עצמו יכולה להחזיק אותו שלם מול הגאות; בתוכו, הגוף מוחזק רק בבסיסו.) השינוי אינו בכבידה אלא בעוצמתה מול הסיבוב: כשהגוף נעשה צפוף יותר בסיבוב כמעט זהה, הפחיסות שהסיבוב החזיק עולה על מה שהוא יכול לשאת, והקוטב הופך מראש גבעה לקרקעית עמק. 120 הק"מ הם קנה המידה של מה שהסיבוב החזיק למעלה וההתעגלות משחררת.

B.5 בור ניקוז בקוטב

הפרשנות. התמונה הטבעית של "משהו משך את זה פנימה": ניקוז, שקיעה, מערבולת פנימית מתחת לכל קוטב, שאוספת את פני השטח לעבר נקודה — כמו מים על רצפת כיור שמתקבצים לעבר פתח הניקוז.

מה היא צופה. בור ניקוז אוסף לעבר נקודה: הצפיפות צריכה לעלות ללא גבול לעבר הקוטב עצמו, והקוטב צריך לשבת בשקע. היא גם דורשת כוח שמכוון אל הקוטב.

מה הספירות אומרות. סביב הקוטב הצפוני, שבו שום אגן או ים אינם מגיעים למרחק 20° ממנו, הצפיפות עולה מ-189 (כיפה של 60°) ל-227 (30°), ל-270 (20°) ול-300 (15°) — ואז נעצרת: 298 בכיפה של 10° (A.6). הריכוז הוא לעבר האזור הקוטבי, לא לעבר הנקודה. בדרום, לאחר המסכה, הכיפות הפנימיות עולות ל-305 ב- 15°

ול-348 ב-10° (A.7); אבל בתוך 20° מן הקוטב הדרומי המסכה היא South Pole–Aitken בלבד, והכיפה של 10° נשענת על 36 מכתשים, כך שהעלייה הפנימית שם נושאת את הגאומטריה של האגן ואת הספירה הקטנה, לא בור ניקוז נקודתי. (עם כמה עשרות מכתשים, קומץ מכתשים יותר או פחות מזיז את הצפיפות בשיעור גדול; הרצף הצפוני הנקי הוא שנושא את משקל המבחן.) והטופוגרפיה אינה מראה זוג מתאים של שקעים קוטביים.

הכרעה. נכשלת בצורה. בגוף מסתובב, כל כוח סימטרי סביב הציר, וסימטריה סביב ציר יוצרת טבעת, לא נקודה; אין כוח שמכוון אל הקוטב עצמו. העודף אכן שייך לטבעת — הטבעת שב-90° מן הנקודה הפונה לכדור הארץ, העוברת דרך שני הקטבים ושני הצדדים (A.9, C.3) — והקטבים עומדים בראשה משום שהציר עובר דרכם. זו הגאומטריה של התשובה, לא של בור ניקוז. לפרשנות בור הניקוז יש סימן נכון אבל דפוס שגוי: היא דורשת שיא בנקודה, והספירות מראות רמה על פני אזור ורצועה צפופה סביב הגוף כולו.

B.6 שינוי אחיד

הפרשנות. התנפחות אחידה, התכווצות אחידה עם ההתקררות, כבידה עצמית שמושכת הכול לעבר המרכז — שינוי בגודל ולא בצורה. כל אחד מאלה הוא תהליך ממשי בתולדותיו של גוף צעיר וחם, וכל אחד מזיז את פני השטח כולם.

מה היא צופה. כל אחד מהם משנה כל יסוד של פני השטח באותו יחס. המרווח בין המכתשים גדל או קטן באותה מידה בכל מקום, והצפיפות משתנה באותו גורם בקוטב ובקו המשווה:

$$\frac{\rho_{\text{pole}}}{\rho_{\text{equator}}}\bigg|_{\text{after}} = \frac{\rho_{\text{pole}}}{\rho_{\text{equator}}}\bigg|_{\text{before}} = 1.00$$

עבור משטח שהתכתש באופן אחיד. המשוואה אומרת ששינוי בגודל מכפיל את המונה ואת המכנה באותו גורם, ולכן היחס ביניהם אינו יכול לזוז: בלון שמנופח באופן אחיד הופך את כל הנקודות שעליו לדלילות יותר, אבל שום חלק אינו דליל יותר מחלק אחר.

מה הספירות אומרות. 1.32 בספירה הגולמית, 1.20 בספירה הנקייה, ועלייה עם גודל המכתש עד 1.53.

הכרעה. נכשלת בסימן ובגודל כאחד: היא אינה יוצרת עודף כלל. זו הפרשנות שהראתה את הדרך. שינוי בגודל אינו יכול ליצור עודף קוטבי; רק שינוי בצורה יכול, והוא חייב להיות לא-אחיד באופן מסוים — עליו לכווץ את פני השטח בקטבים יותר מאשר בקו המשווה, ועליו להיות סימטרי סביב ציר הסיבוב. B.2 ו-B.3 הם שינויי צורה בסימן השגוי; התשובה היא ההיפוך שלהם. מאחורי הקלעים, כאן הצטמצם החיפוש: משנשלל שינוי בגודל, השאלה כבר לא הייתה מה משך את המכתשים אל הקטבים אלא איזה שינוי צורה מכווץ את המשטח הקוטבי יותר מכול, ורק שינוי צורה אחד בתולדות המודל עושה זאת.

B.7 התשובה, ומדוע היא זו שנשארת

שינוי צורה אחד עושה בדיוק את מה ש-B.6 דורש: גוף פחוס שחוזר לכדור. הסימן שלו נכון — הוא B.2 ו-B.3 בקריאה הפוכה. המנוע שלו הוא הכבידה של B.4, במקומה הנכון, ברגע שמרכז המסה של הגוף עבר את קו הקורוטציה והגוף כבר אינו לחוץ על הבסיס שלו, בעודו עדיין מסתובב עם כדור הארץ. הצורה שלו היא הטבעת של B.5, והקטבים בראשה משום שהציר עובר דרכם. הגודל שלו נובע מן הצורה שהמכתשים עצמם רושמים סביב ששת הצירים (A.9), כשהיא נבדקת מול צורת Maclaurin של C.1: טווח מכ-1.5 (מכתשים שנוצרו בשיא, על הגוף הפחוס ביותר) ועד כ-1.2 (אלה שנוצרו מאוחר בהתעגלות), לעומת ספירה נקייה של 1.20 ± 0.05 . שעולה עם גודל המכתש מ-1.09 ל-1.53; לכל המכתשים של 20 ק"מ ומעלה הצורה של ששת הצירים חוזה 1.21. (צורת Maclaurin היא צורת שיווי המשקל המדויקת של גוף נוזלי אחיד מסתובב; בהינתן קצב הסיבוב והצפיפות בלבד, היא קובעת עד כמה הגוף פחוס, ולכן כמה התעגלות זמינה כדי לצופף את הקטבים.) הוא שורד את המסכה, כמו הספירות. זמנו הוא לפני השחרור, בשלב החיבור עם הסיבוב של כדור הארץ, כל עוד הפנים היה רך

והקליפה החיצונית כבר קשיחה, כך שההתעגלות בנתה את הלחץ של C.4: הפחיסות גדלה כשהגוף נע החוצה על קצה האגס והגיעה לשיאה כשהתקרב לבסיס של 3,000 ק"מ סמוך לקו הקורטציה ($a:b:c$ בערך 1.8 : 1.4 : 1, והגוף המתוח נפוח בכ-1,700 ק"ג/מ"ק); הגוף התעגל לאחר שמרכז המסה שלו עבר את הקו, בירידת נפח, לכ-1.20 מאוחר בהתעגלות, ובשחרור היה עגול והקליפה שלו קשיחה. והוא נותן תחזיות שאפשר לבדוק.

העלייה עם גודל המכתש היא החלק של הראיות שמצביע באופן הישיר ביותר על התעגלות לאורך זמן. מכתש שומר רק את הציפוף של ההתעגלות שהתרחשה אחרי שנוצר: המכתשים הגדולים, שנוצרו סמוך לשיא על הגוף הפחוס ביותר, עברו את ההתעגלות כולה; הקטנים, שנוצרו מאוחר, עברו רק את סופה. אף פרשנות מבין B.1–B.6 אינה גורמת לעודף להיות תלוי בגודל המכתש; ההתעגלות מחייבת זאת.

הטבלה מרכזת את שש הפרשנויות מול ארבע השאלות. כל שורה היא פרשנות אחת; תא צבוע מסמן שאלה שבה היא נכשלת; קו מפריד פירושו שהשאלה אינה עולה, משום שהפרשנות כבר נכשלה בסימן או שאינה עוסקת בשאלה הזאת. העמודה האחרונה אומרת מה כל פרשנות שנדחתה תורמת לתיאור. בקריאה מלמעלה למטה, כל פרשנות שנדחתה משאירה משהו אחריה, והשורה האחרונה אוספת אותם: המתיחה של B.2 ו-B.3 מספקת את הצורה שיש לבטל, הכבידה של B.4 את המנוע, הטבעת של B.5 את הגאומטריה, B.6 את הצורך בשינוי צורה, ו-B.1 את הימות והאגנים הנמוכים.

פרשנות	סימן	גודל	צורה	מסכה	נשמרת בתור
B.1 שימור	כן	—	לא	לא	הימות והאגנים הנמוכים
B.2 פחיסות סיבובית	לא	—	—	—	המתיחה שההתעגלות מבטלת
B.3 אפקט רוש	לא	—	—	—	הצורה של C.2
B.4 כבידה קוטבית	לא	—	—	—	המנוע של ההתעגלות (C.4)
B.5 בור ניקוז	כן	—	לא	—	—
B.6 שינוי אחיד	לא	לא	—	—	הצורך בשינוי צורה
התעגלות (חלק C)	כן	(נקייה) 1.2–1.5 / 1.20	טבעת, הקטבים תחילה	כן	התשובה

טבלה: שש הפרשנויות שנדחו ותשובת ההתעגלות מול ארבע השאלות — סימן, גודל, צורה ומסכה; תא צבוע מסמן כישלון.

מה שיש בידינו עכשיו: סיבה אחת — ההתעגלות של גוף פחוס בירידת נפח, משוחרר מן הבסיס שלו ומונע בידי הכבידה של עצמו בזמן שעדיין היה מחובר — שעוברת את כל ארבע השאלות, ושש פרשנויות שכל אחת מהן נכשלת לפחות באחת מהן, ובכל זאת משאירה חלק לתיאור. אנו מנסחים אותה בחלק C.

חלק C — המנגנון

חלק B הסתיים בתשובה אחת שנותרה עומדת: גוף פחוס שחוזר להיות כדור. חלק זה הופך את התשובה הזו למנגנון. הוא שואל איזו צורה הייתה לירח הצעיר, מה שינה את הצורה הזו, מה השינוי עשה לפני השטח שלו, ואיזה כוח הניע אותו. סעיפים C.1 ו-C.2 מחשבים את הצורה; סעיף C.3 עוקב אחר פני השטח לאורך ההתעגלות ונותן את הציפוף החזוי של המכתשים בקטבים; סעיף C.4 מצביע על המנוע — הכבידה של הגוף עצמו — ועל הלחץ הפנימי שהיא בונה בדרך.

הכוחות, ורצף הצורה. הכבידה של הירח הצעיר עצמו משכה כל חלק אל מרכזו, ולבדה הייתה עושה אותו כדור. הסיבוב שלו עם כדור הארץ דחף את המשווה שלו החוצה והנמיך את הקטבים. והוא נמתח לאורך הקו שבין כדור הארץ לירח בין שתי משיכות מנוגדות: הכבידה של כדור הארץ משכה את הצד הקרוב שלו פנימה, לעבר כדור הארץ, והאפקט הצנטריפוגלי של הסיבוב בקורטציה משך את הגוף החוצה; החלק הקרוב שלו הוחזק על קצה האגס. המתיחה קיצרה את הצירים האחרים, את ציר הקטבים יותר מכולם. רצף הצורה נובע מן הכוחות האלה. מסה סיאלית התאספה בקצה האגס — עדיין קצה האגס — והחלה לצאת ולהיפחס, תחילה על בסיס ברוחב 6,000 ק"מ, מחוברת. ככל שנעה החוצה הבסיס שלה הצטמצם מ-6,000 ל-3,000 ק"מ, והיא קיבלה צורה וגוף משלה, נפרדת מן האגס אך פחוסה. הפחיסות נוצרה כשהאגס הגיע לקורטציה, משום ששני צדי הגוף נמשכו לכיוונים מנוגדים, והגוף היה הפחוס ביותר כשהתקרב לבסיס של 3,000 ק"מ; את הצורה הזו מודדים סעיפים C.1 ו-C.2. בתוך שלב ה-3,000 ק"מ, ברגע שמרכז המסה שלו עבר את קו הקורטציה, המשיכה נטו שלחצה אותו על הבסיס שלו ירדה לאפס (C.6): הקורטציה נתנה לו להתעגל ולהיפרד. הוא התעגל בירידת נפח — המתיחה השתחררה, והגוף נעשה קטן וצפוף יותר. ההתעגלות באה מאוחר, אחרי הפחיסות, סמוך לקורטציה; ברגע השחרור הגוף היה עגול וקליפתו החיצונית קשיחה (מאמר 2, B.7§). אילו האגס לא התארך כדי לשאת אותו לשם, המסה הייתה חוזרת. מה שהאטת הסיבוב הנעול הסירה אחרי השחרור הייתה רק הבליטה הגאותית והסיבובית הקטנה של גוף קשיח (C.5). ההתעגלות של סעיף C.3 היא מה שהכבידה של הגוף עצמו עשתה כשהמשיכות שהחזיקו את הפחיסות הרפו.

C.1 הצורה ההתחלתית: סיבוב וצפיפות

שאלת הסעיף היא כמה פחוס היה הירח בשיא הפחיסות שלו, איזו צורה הייתה לו, וכיצד ירדה הפחיסות הזו כשהתעגל. חלק הסיבוב של המדד דורש שני גדלים בלבד: באיזו מהירות הגוף הסתובב ומה הייתה צפיפותו.

גוף רך שמסתובב מקבל צורה של ספרואיד פחוס — כדור שנלחץ בקטבים והתרחב במשווה, ועגול כשמביטים בו מעל הקוטב. בצק פיצה שזורקים ומסובבים באוויר מתרחב באותו אופן. לנוזל הומוגני בעל כבידה עצמית — גוף בצפיפות אחידה שמוחזק יחד רק בכבידתו שלו, בלי חוזק משלו — הצורה ידועה במדויק; זהו ספרואיד מקלורן. יהי a הרדיוס המשווני שלו ו- c הרדיוס הקוטבי. האקסצנטריות שלו, $e = \sqrt{1 - c^2/a^2}$, מודדת כמה הוא רחוק מכדור: $e = 0$ לכדור, $e = 1$ מתקרב ל-1 ככל שהגוף נפחס לדסקה. ספרואיד כזה נמצא בשיווי משקל — כל חלקיק על פני השטח במנוחה, והמשיכה פנימה של הכבידה מאזנת בדיוק את ההשלכה החוצה של הסיבוב — בקצב הסיבוב Ω שעבורו:

$$\frac{\Omega^2}{\pi G \rho} = \frac{2\sqrt{1-e^2} (3-2e^2)}{e^3} \arcsin e - \frac{6(1-e^2)}{e^2}$$

כאן Ω היא המהירות הזוויתית של הסיבוב (2π חלקי זמן המחזור), G קבוע הכבידה ו- ρ הצפיפות. האגף השמאלי משווה את הסיבוב לכבידה העצמית של הגוף: ההשלכה החוצה גדלה כ- Ω^2 , והמשיכה פנימה של גוף אחיד גדלה עם $G\rho$. האגף הימני תלוי בצורה בלבד. הוא עולה מאפס בכדור ועד למקסימום של 0.4493 ב- $e = 0.930$)

$a/c = 2.72$, ומעבר לו לא קיימת צורת מקלורן. במילים: ככל שהסיבוב מהיר יותר ביחס לכבידה, צורת שיווי המשקל פחוסה יותר, עד גבול שמעבר לו שום צורה אינה יכולה להתאזן. מידת הפחיסות תלויה אפוא בסיבוב ובצפיפות יחד: גוף קל נפחס יותר מגוף צפוף באותו קצב סיבוב, כי כבידתו החלשה מתנגדת פחות לסיבוב. פתרון היחס עבור ערכי הסדרה נותן את יחס הצירים a/c , הרדיוס המשווני חלקי הרדיוס הקוטבי:

זמן מחזור הסיבוב	$\rho = 1000$	1,300	1,600	1,700	2,000	2,600	3,344
5.5 שעות (שיא הפחיסות)	אין שיווי משקל	1.69	1.46	1.41	1.32	1.22	1.16
5.77 שעות (מאוחר בהתעגלות)	2.22	1.56	1.39	1.35	1.28	1.20	1.14

יחס הצירים a/c של ספרואיד מקלורן, לפי זמן מחזור הסיבוב והצפיפות (ק"ג/מ"ק).

כשקוראים את הטבלה לאורך שורה, הצורה מתעגלת ככל שהצפיפות גדלה: אותו סיבוב אינו יכול להחזיק צורה פחוסה כל כך כנגד גוף צפוף יותר שמושך חזק יותר. כשקוראים אותה לאורך עמודה, הצורה מתעגלת מעט כשהסיבוב מאט מ-5.5 ל-5.77 שעות. שני הערכים המודגשים הם שני קצות ההתעגלות של חלק הפיתה: הגוף הנפוח בשיא הפחיסות, כ-1,700 ק"ג/מ"ק, והגוף הצפוף מאוחר בהתעגלות. הערך ב-1,300 ק"ג/מ"ק, 1.69, הוא הצורה שהמסה הקלה שהתאספה בקצה האגס הייתה מקבלת כנוזל מן הסיבוב לבדו; הוא נשמר כהקשר, ולא כשיא הנמדד.

ב-5.5 שעות וב-1,000 ק"ג/מ"ק לא קיימת צורת שיווי משקל: הסיבוב עולה על המקסימום של היחס, והגוף היה משיל מסה מן המשווה שלו. המקסימום קובע חסם תחתון לצפיפות בכל קצב סיבוב, $\rho_{\min} = \Omega^2 / (0.4493 \pi G)$, שב-5.5 שעות הוא 1,070 ק"ג/מ"ק: גוף קל מזה כלשהו, שמסתובב פעם אחת ב-5.5 שעות, אינו יכול להחזיק את עצמו כנוזל.

מתי הוא היה הפחוס ביותר? לפני הפחיסות המסה הייתה עדיין קצה האגס, בכ-1,300 ק"ג/מ"ק, וכדור הארץ קבע את צורתה. במהלך הפחיסות היא נעשתה גוף משלה, עדיין מחובר: הוא יכול היה להחזיק צורה משלו מגבול רוש הקשיח המתאים לצפיפותו והלאה. גבול רוש הוא המרחק מכדור הארץ שבתוכו הגאות של כדור הארץ, שמושכת את הצד הקרוב של גוף חזק יותר מן הצד הרחוק, עולה על הכבידה העצמית של הגוף; מחוצה לו הגוף יכול להחזיק את עצמו. לגוף בעל קשיחות מסוימת (הגבול ה"קשיח") המרחק קטן מאשר לנוזל טהור. ב-1,300 ק"ג/מ"ק הוא 12,994 ק"מ (הגבול משתנה כ- $\rho^{-1/3}$, כך שגוף צפוף יותר יכול להחזיק את עצמו קרוב יותר; 10,314 ק"מ הוא ערכו ב-2,600, מאמר 2). משם הוא נע החוצה על בסיס שהצטמצם מ-6,000 לעבר 3,000 ק"מ, והיה הפחוס ביותר כשהתקרר לבסיס של 3,000 ק"מ, סמוך לקו הקורוטציה (15,818 ק"מ ביממה של 5.5 שעות), שם הכבידה של כדור הארץ על הצד הקרוב שלו והמשיכה הצנטריפוגלית של הקורוטציה משכו אותו לכיוונים מנוגדים.

איזו צורה הייתה לו. הצורה בשיא לא הייתה ספרואיד. הסיבוב פחס את הגוף סביב צירו, ושתי המשיכות המנוגדות מתחו אותו בנוסף לאורך קו כדור הארץ, כך ששלושת הצירים שלו היו שונים: ארוך לכיוון כדור הארץ (a), בינוני לאורך המסלול (b), קצר דרך הקטבים (c) — ביצה שהיא גם פיתה. המכתשים רושמים את הצורה הזו (A.9, C.3): בערך 1.8 : 1.4 : 1 בשיא, בתוך הטווח 1.64 : 1.45 : 1 עד 1.95 : 1.33 : 1, ו-1.37 : 1.15 : 1 בממוצע על כל המכתשים של 20 ק"מ ומעלה. הצורה מתונה: הציר הארוך פי 1.6–1.95 מן הקוטבי, הבינוני פי 1.33–1.45.

הצפיפות בשיא. שתי בדיקות בלתי תלויות ממקמות את הגוף בשיא סביב 1,700 ק"ג/מ"ק. ראשית, חלק הפיתה של הצורה, $b/c \approx 1.4$, הוא החלק שהסיבוב קובע: בקירוב ראשון ההפרש בין הציר הבינוני לציר הקצר של גוף מסתובב שנמתח לאורך קו כדור הארץ תלוי בסיבוב בלבד, ולכן אפשר לקרוא אותו על יחס Maclaurin.

ב-5.5 שעות היחס מחזיק $b/c = 1.41$ על גוף של 1,700 ק"ג/מ"ק (מודגש בטבלה); הטווח הנמדד של חלק הפיתה, 1.33–1.45, מתאים ל-1,615–1,960 ק"ג/מ"ק, ומרכז ל-1,600–1,750. שנית, ההתעגלות חייבת לסגור כל חלק של פני השטח. גוף מתוח תופס נפח רב יותר מאותו גוף רפוי; כשהמתיחה משתחררת, הנפח שלו יורד. אילו הגוף בשיא היה צפוף מכ-1,800 ק"ג/מ"ק, הירידה הייתה קטנה מדי, וקצות קו כדור הארץ היו צריכים לגדול בזמן ההתעגלות במקום להיסגר (C.3). שתי הבדיקות מסכימות: הגוף בשיא היה מתוח ונפוח, בכ-1,700 ק"ג/מ"ק, ורדיוס הכדור השקול שלו — הרדיוס של כדור באותו נפח — כ-2,180 ק"מ, מול 1,890 ק"מ בשחרור ו-1,737 ק"מ היום. המסה הקלה שהתאספה בקצה האגס, 1,300 ק"ג/מ"ק (כ-2,380 ק"מ), נמצאת בתחילת הרצף, לפני הפחיסות.

כיצד הוא התעגל. לאחר שמרכז המסה עבר את הקו הגוף התעגל, בשני חלקים. חלק הביצה — המתיחה לאורך קו כדור הארץ — השתחרר ראשון: על הקו המשיכה נטו שלחצה את הגוף על הבסיס שלו ירדה לאפס (C.6). חלק הפיתה — פחיסות הסיבוב — הלך עם ההתעבות בסיבוב כמעט קבוע (C.4): הצפיפויות של הרצף (2,000, 2,300, 2,600 ק"ג/מ"ק) וההתארכות הקלה של יממת כדור הארץ (5.77 שעות ברגע השחרור) נותנות את הסולם שלו, ויחס הצירים ירד — לכ-1.20 מאוחר בהתעגלות. גוף נזולי שמסתובב פעם אחת בכמה שעות אינו יכול להיות כדור. הצעד מכ-1.20 אל הגוף העגול ברגע השחרור אינו מחושב במאמר זה; הוא דרישה של המודל: הקליפה החיצונית הקשיחה מחזיקה את הצורה עגולה, ומאמר 2 (B.7§) מראה שקליפה בקשיחות $\mu \geq 10 \text{ GPa}$ שומרת על יחס צירים של 1.04 לכל היותר. ברגע השחרור הירח עגול. הפחיסות שנותרה אחרי השחרור היא רק הבליטה הגאותית והסיבובית הקטנה של הגוף הקשיח הזה, וגם היא נעלמת כשהסיבוב של הירח הנעול מאט יחד עם מסלולו (C.5).

הטבלה היא היחס שלמעלה, נפתר בכל תא; היא אינה תלויה בדבר מלבד Ω ו- ρ , וקורא יכול לשחזר אותה מן המשוואה בלבד. מה שיש בידינו עכשיו: צורת שיא תלת-צירית של כ-1.8 : 1.4 : 1, על גוף מתוח בכ-1,700 ק"ג/מ"ק, כשהתקרב לבסיס של 3,000 ק"מ סמוך לקו הקורוטציה; התעגלות שבה חלק הביצה השתחרר על הקו וחלק הפיתה ירד עם ההתעבות, לכ-1.20 מאוחר בשלב; וגוף עגול ברגע השחרור.

2.c הרכיב הגאותי: הצורה החופשית ב-2,600 ק"ג/מ"ק

סעיף C.1 טיפל בסיבוב בלבד. סעיף זה מוסיף את הכוח השני שעיצב את הגוף, הגאות של כדור הארץ, ומראה מה היא עושה לצורה. התוצאה משמשת להמחשת חלקה של הגאות, לא כבסיס המבחן (ראו בסוף הסעיף).

גוף קרוב לכדור הארץ שמסתובב איתו לא רק נפח בסיבובו, אלא גם נמתח לאורך הקו שבין כדור הארץ לירח בין שתי משיכות מנוגדות: הכבידה של כדור הארץ מושכת את הצד הקרוב שלו פנימה, לעבר כדור הארץ, והאפקט הצנטריפוגלי של הסיבוב מושך את הגוף החוצה. בירח המחובר החלק הקרוב הוחזק על קצה האגס. הצורה החופשית שמחושבת להלן, של גוף שאין דבר מחובר אליו, היא ההמחשה הקלאסית של מתיחה כזו. גוף נזולי הומוגני בסיבוב סינכרוני — מסתובב פעם אחת על צירו בכל הקפה, כך שהוא מראה תמיד את אותו פן לכדור הארץ — במרחק r ממסה M מקבל צורה של אליפסואיד רוש, בעל שלושה צירים שונים: a לעבר כדור הארץ, b בכיוון התנועה, c לאורך הקטבים. בעוד שצורת מקלורן עגולה כשמביטים בה מן הקוטב, צורת רוש דמוית ביצה מכל צד.

הצורה נקבעת על ידי שלושה תנאים, אחד לכל ציר. בתוך אליפסואיד הומוגני בעל חצאי צירים a, b, c , הפוטנציאל הכבידתי — האנרגיה לק"ג שיש לחלקיק בזכות מקומו בכבידת הגוף, הנמוכה ביותר היכן שהכבידה משכה אותו הכי עמוק פנימה — הוא:

$$\Phi_g = -\pi G \rho \left(I - A_1 x^2 - A_2 y^2 - A_3 z^2 \right), \quad A_i = abc \int_0^\infty \frac{du}{(a_i^2 + u) \Delta(u)}, \quad \Delta = \sqrt{(a^2 + u)(b^2 -$$

כאשר $A_1 + A_2 + A_3 = 2$ (סמלי האינדקס של Chandrasekhar). במילים: בתוך האליפסואיד הפוטנציאל עולה כריבוע המרחק מן המרכז לאורך כל ציר, והמקדמים A_1, A_2, A_3 אומרים באיזו תלילות הוא עולה לאורך כל אחד מהם. הם תלויים בצורה בלבד; לציר הקצר ביותר המקדם הגדול ביותר, כי לאורכו מסת הגוף קרובה ביותר. I הוא קבוע של הצורה, ו- x, y, z נמדדים לאורך a, b, c .

במערכת המסתובבת עם המסלול, $\Omega^2 = G(M+m)/r^3$ (קצב ההקפה, כאשר m מסת הגוף), נוספים שני איברים. כדור הארץ מוסיף את הפוטנציאל הגאותי $-\mu(x^2 - \frac{1}{2}y^2 - \frac{1}{2}z^2)$, כאשר $\mu = GM/r^3$: הוא מנמיך את הפוטנציאל לעבר הקו אל כדור הארץ (x) ומגביה אותו לרוחבו (y ו- z) — מתיחה לאורך הקו, לחיצה לרוחבו. הסיבוב מוסיף את הפוטנציאל הצנטריפוגלי $-\frac{1}{2}\Omega^2(x^2 + y^2)$, שמנמיך את הפוטנציאל הרחק מציר הסיבוב ומשאיר את הכיוון הקוטבי (z) כמות שהוא. פני שטח של נוזל במנוחה חייבים להיות שווי פוטנציאל — משטח שבו הפוטנציאל שווה בכל מקום, כמו פני השטח של אגם שקט; אחרת הנוזל היה זורם במורד לאורכם. פני השטח הם שווי פוטנציאל של הסכום רק אם שלושת המקדמים עומדים ביחס הצירים:

$$\left(A_1 - \frac{\Omega^2/2 + \mu}{\pi G \rho}\right)a^2 = \left(A_2 - \frac{\Omega^2/2 - \mu/2}{\pi G \rho}\right)b^2 = \left(A_3 + \frac{\mu/2}{\pi G \rho}\right)c^2$$

כל סוגריים הם המשיכה נטו פנימה לאורך ציר אחד: הכבידה (A_i) פחות מה שהגאות והסיבוב מחסירים, או, לאורך הקטבים, הכבידה ועוד הלחיצה של הגאות. כשמכפילים אותם בריבוע הציר, שלושתם חייבים להיות שווים, כדי שהפוטנציאל בקצות שלושת הצירים יהיה זהה. אלה שתי משוואות לשני היחסים b/a ו- c/a . כשפותרים אותן ב-20,595 ק"מ, מרחק שנמצא מעט מעבר לגבול רוש הנוזלי של גוף בצפיפות 2,600 ק"ג/מ"ק (מרחק השחרור של גרסה קודמת של הסדרה, מאמר 3), כהמחשה לחלק הגאותי של הצורה (גרסה קודמת כינתה אותו הרדיוס הראשון שבו גוף כזה יכול להחזיק את עצמו):

r (ק"מ)	ρ	$a:b:c$	R_s/c	R_s/a
19,660	2,600	אין שיווי משקל (בתוך גבול רוש הנוזלי, 19,971)	—	—
20,595	2,600	1:0.637:0.601	1.208	0.726
20,595	3,344	1:0.763:0.726	1.131	0.821

אליפסואיד רוש של גוף נוזלי בסיבוב סינכרוני: יחס הצירים והשינוי הנדרש בקוטב ובנקודה שמתחת לכדור הארץ כדי להגיע לכדור בעל אותו נפח.

כך קוראים את הטבלה: $a:b:c$ נותן את שלושת הצירים, כשהציר הארוך, לעבר כדור הארץ, נקבע כ-1. הצורה 1:0.637:0.601 ארוכה וצרה — הציר לעבר כדור הארץ ארוך בשני שלישים מן הציר הקוטבי. R_s הוא רדיוס הכדור בעל אותו נפח, $R_s = (abc)^{1/3}$; שתי העמודות האחרונות אומרות כמה הקוטב והנקודה שמתחת לכדור הארץ צריכים לזוז כשהגוף הופך לכדור הזה. $R_s/c = 1.208$ פירושו שהקוטב צריך לעלות החוצה בכחמישית; $R_s/a = 0.726$ פירושו שהנקודה שמתחת לכדור הארץ צריכה לשקוע פנימה בכרבע. הגוף הצפוף יותר (3,344 ק"ג/מ"ק) נמשך לצורה פחות קיצונית, כמו בסעיף C.1.

הפתרון נבדק על ידי פתרון מחדש של שני התנאים מנקודת התחלה חופשית: ב-20,595 ק"מ וב-2,600 ק"ג/מ"ק הוא מחזיר 1:0.634:0.598, וב-3,344 ק"ג/מ"ק 1:0.762:0.725 — הצורות שבטבלה בטווח של חצי אחוז. בצורה זו שלושת האיברים של התנאי מתאימים זה לזה בטווח של שני חלקים לאלף.

שני דברים שהחישוב קובע לפני כל פרשנות. ראשית, ב-1,300 ק"ג/מ"ק לא קיימת צורה נוזלית באף אחד משני הרדיוסים (גבול רוש הנוזלי שלה הוא כ-25,200 ק"מ): הגוף לא יכול היה להגיע לשחרור בצפיפות של הגוף

היושב על קצה האגס (1,300 ק"ג/מ"ק). זה מה שמאמר 2 הניח כשלקח 2,600 לגבולות רוש שלו, והחישוב כאן מאשר זאת מן הצד השני. שנית, ב-2,600 גם הצורה ב-19,660 אינה קיימת, בעוד שב-20,595 היא קיימת: גבול רוש הנוזלי נמצא ביניהם — 19,971 ק"מ לפי המקדם הקלאסי שבו משתמש מאמר 2, כ-20,100 ק"מ כשפותרים את התנאים שלמעלה במדויק ($k = 0.09$).

כיצד לקרוא את הצורה הזו. זו הצורה שגוף נוזלי בצפיפות 2,600 ק"ג/מ"ק היה מקבל מעט מעבר למרחק שבו הוא יכול להחזיק את עצמו לראשונה. ברצף הנוכחי הירח משתחרר מוקדם יותר וקרוב יותר — כ-16,400 ק"מ במשווה (16,399 ק"מ ביממת כדור הארץ של 5.77 שעות), 17,287 ק"מ ב-22.5° (מאמרים 2 ו-4) — ושם לא קיימת צורה נוזלית חופשית ב-2,600 ק"ג/מ"ק: הגוף שם מוחזק על ידי קליפתו הקשיחה, לא על ידי שיווי משקל נוזלי (מאמר 2, B.7§). הצורה של סעיף זה משמשת לכן רק להמחשה של האופן שבו שתי המשיכות המנוגדות מוסיפות מתיחה לאורך הקו אל כדור הארץ לפחיסות הסיבובית של סעיף C.1; הציפוף שהמאמר בודק נובע מן הפחיסות ומן ההתעגלות שבאה אחריה (C.1, C.5, D.2).

C.3 התעגלות בירידת נפח: מה עושים פני השטח

סעיפים C.1 ו-C.2 נתנו את הצורה. סעיף זה שואל מה קורה לפני שטח שכבר מכוסים במכתשים כשהצורה הזו חוזרת להיות כדור בזמן שהנפח שלה יורד — המתיחה משתחררת, והגוף נעשה קטן וצפוף יותר — אילו חלקים של פני השטח נסגרים יותר מכל, אילו פחות מכל, ולכן היכן המכתשים מצטופפים. זה החישוב המרכזי של המאמר. המבחן שהוא נותן הוא יחס, הציפוף של הקטבים לעומת המשווה, והיחס הזה אינו תלוי בכמה התכווץ הגוף בכללו.

מינוח. הסדרה מכנה שלושה שינויי צורה, לפי סדרם: *ההתעגלות החוצה*, שבה הגוף היושב על קצה האגס הופך לכדור (מאמר 3, B.4§); *הפחיסות*, כשהגוף נע החוצה ונמתח בין הכבידה של כדור הארץ למשיכה הצנטריפוגלית של הקורוטציה; ו*ההתעגלות פנימה*, לאחר שמרכז המסה שלו עבר את קו הקורוטציה. ההתעגלות של המאמר הזה היא ההתעגלות פנימה.

הבלון. מנפחים בלון, מכסים אותו בנקודות באופן אחיד, ומוציאים את האוויר. הנקודות אינן נשארות במקומן: הן מתקבצות לעבר שני הקצוות — הפטמה בקצה אחד והפה בקצה השני. שתי הנקודות האלה לא זזו; כל מה שסביבן, שנמתח קודם, התכווץ לעברן. שני דברים קובעים היכן הנקודות מתקבצות כשמשטח מתוח נרפה: כמה נמתח כל חלק של המשטח, ואיזו נקודה עומדת במקומה. הנקודות מתקבצות בנקודה העומדת, מן הסביבה שהתכווצה. המקרה של הירח הוא אותה תמונה עם הבדל אחד של כיוון: הבלון נמערך ולא מנופח — כדור שנלחץ שטוח בין שתי כפות ידיים, החלק העליון והתחתון שלו נעשים רחבים ושטוחים. כשמרימים את כפות הידיים והכדור קופץ בחזרה, החלק העליון הרחב והשטוח נאסף פנימה, והנקודות שעליו מתקרבות זו לזו לעבר מרכזו.

מדוע הקוטב עומד במקומו. על הירח הנקודות העומדות הן הקטבים, ולא משום שהם עבים או כבדים יותר — הקרום בקטבים אינו עבה יותר מאשר בחגורה שהם נמצאים עליה (GRAIL, מאמר 11), והכבידה אינה מושכת חומר לצדדים (B.4). הם עומדים במקומם משום שציר הסיבוב עובר דרכם. הסיבוב פחס את הירח באופן סימטרי סביב צירו: כל קו אורך עוות באותו אופן, ורק שתי הנקודות שעל הציר לא נדחפו לשום מקום, כי אין להן "החוצה" משלהן. כשהפחיסות נרפתה, כל מה שנדחף חזר לאורך אותם קווי אורך — וכל קווי האורך נפגשים בנקודה שמעולם לא זזה. הקוטב עומד משום שהציר עובר דרכו; הוא מקבץ משום שכל קו אורך חוזר אליו, כפי שכל חיזורי הגלגל נפגשים בטבור. זו גם הסיבה שיש שניים כאלה ושהם מנוגדים בדיוק. המודל מניח שהקטבים שסביבם הגוף התעגל הם הקטבים של היום: ייתכן ששנטיית הציר השתנתה מאז, אבל הקטבים נשארו במקומם. מערכת הצירים בכללה — של כדור הארץ, של הירח ושל המסלול — מושארת לעבודה עתידית.

וכמה נמתח היכן. בגוף הפחוס המשטח הקוטבי היה המתוח ביותר — הקוטב של ספרואיד פחוס שטוח ורחב — והמשווה המתוח פחות. שתי המשיכות המנוגדות — הכבידה של כדור הארץ על הצד הקרוב, פנימה,

והמשיכה הצנטריפוגלית של הקורוטציה, החוצה — מתחו את הגוף המחובר לאורך הקו שבין כדור הארץ לירח, כשחלקו הקרוב מוחזק על קצה האגס; בקצות הקו הזה פני השטח מתקבצים, והם היו המתוחים פחות מכל. לכן המשטח שמתכווץ יותר מכל בהרפיה הוא המשטח הקוטבי, והמשטח שמתכווץ פחות מכל נמצא בקצות הקו אל כדור הארץ. המכתשים הולכים בעקבות זה: צפופים בקטבים, דלילים בנקודה שמתחת לכדור הארץ (94 ל- 10^6 קמ"ר, A.9). הבלון נותן את אותה תוצאה: צפיפות ליד הפטמה, דלילות על הבטן.

הטבעת, ומדוע הקטבים בראשה. הציפוף אינו שייך לקטבים בלבד. הוא שייך לכל הטבעת שעומדת במרחק 90° מן הנקודה שמתחת לכדור הארץ — הטבעת שעוברת דרך שני הקטבים ושני הצדדים — כי אל הטבעת הזו שני קצות הקו אל כדור הארץ, כשהם נאספים פנימה, שולחים את פני השטח שלהם. בלשון של מה שכל נקודה מקבלת, כשהצורה הגאותית החופשית של סעיף C.2 משמשת להמחשה:

נקודה	מקבלת מכיוון הקו אל כדור הארץ	מקבלת מן הכיוון האחר	גורם הצפיפות
קוטב	$\times 1.38$	(מן הצדדים) $\times 0.88$	$\times 1.21$
צד (מוביל, נגרר)	$\times 1.38$	(מן הקטבים) $\times 0.83$	$\times 1.14$
הנקודה שמתחת לכדור הארץ	$\times 0.88$	$\times 0.83$	$\times 0.73$

מה שכל נקודה מקבלת בהתעגלות, בכל אחד משני הכיוונים לאורך הקרקע, וגורם הצפיפות המשולב (הצורה הגאותית של C.2).

כך קוראים את הטבלה. לכתם קטן של פני שטח יש שני כיוונים לאורך הקרקע. ההתעגלות מקצרת או מאריכה את הכתם לאורך כל אחד מהם, ומספר המכתשים על הכתם אינו משתנה; לכן צפיפות המכתשים מוכפלת בהופכי של כל שינוי, ושני הגורמים מוכפלים זה בזה לעמודה האחרונה. הגורמים נמדדים ביחס לשינוי של פני השטח בכללם: גורם גדול מ-1 פירושו שהכתם נסגר בכיוון זה יותר מפני השטח בכללם, והמכתשים התקרבו; קטן מ-1, שהוא נסגר פחות, והם עומדים רחוקים יותר באופן יחסי. לקוטב, $1.21 = 1.38 \times 0.88$.

הקטבים והצדדים מקבלים במידה שווה מן הקו אל כדור הארץ; הקטבים מקבלים מעט יותר מן הצדדים מאשר הצדדים מקבלים מן הקטבים; ולכן הקטבים מסיימים ב-1.21 והצדדים ב-1.14. הנקודה שמתחת לכדור הארץ אינה מקבלת משום כיוון: בשני הכיוונים שלה היא נסגרת פחות מפני השטח בכללם, וצפיפותה הנמוכה ביותר. כל הטבעת צפופה, והקטבים יותר מכל — וזה מה ששת הצירים מראים, כש-South Pole–Aitken מוצא מן הספירה:

ציר (כיפה של 30°)	≥ 20 ק"מ, ל- 10^6 קמ"ר	≥ 40 ק"מ
הנקודה שמתחת לכדור הארץ	94	32
הנקודה הנגדית לכדור הארץ	204	60
הצד הנגרר	253	84
הצד המוביל	162	58
הקוטב הצפוני	227	87
הקוטב הדרומי	249	82

צפיפות המכתשים בכיפה ברדיוס 30° סביב כל אחד מששת קצות הצירים של הגוף, למכתשים של 20 ק"מ לפחות ושל 40 ק"מ לפחות.

הטבלה סופרת מכתשים של 20 ק"מ לפחות, ושל 40 ק"מ לפחות, בכיפה ברדיוס 30° סביב כל אחד מששת הקצוות של שלושת צירי הגוף, למיליון קמ"ר. כל נקודה על הטבעת צפופה לעומת הנקודה שמתחת לכדור הארץ — הנקודה הפחות צפופה, עם 94, מכילה פחות ממחצית מן המכתשים של הקטבים. ההבדל בין הצד הנגרר לצד המוביל הולך בעקבות הפתחים של הצד המאסף ובעקבות החומר שפיגר אחרי הסיבוב ונחת שם (A.9). הקטבים הם המקום שבו הציפוף הגדול ביותר ושב הוא נמדד בצורה הנקייה ביותר; לכן המאמר נקרא על שמם.

הצורה שששת הכיפות רושמות. הצורה החופשית של C.2 היא המחשה; ששת הכיפות של A.9 נותנות את הצורה עצמה. לצורת ניסיון $a:b:c$ הנוסחה שלהלן קובעת את הציפוף בכל נקודה של פני השטח; כשממצעים אותו על אותן כיפות ממוסכות כמו הספירות, מתקבלים יחס הקטבים לצדדים ויחס הקטבים לשני קצות קו כדור הארץ. הצורה היא זו ששני היחסים שלה שווים לשניים שנמדדו. אחר כך היא מועברת, ללא שינוי, למבחן אחר: ממוצעת על הכיפות והחגורה הנקיות של D.1, היא חוזה את יחס הקטבים לחגורה. הטבלה מציבה את יחסי ששת הכיפות שנמדדו, את הצורה שהם נותנים, ואת התחזית שלה לצד הספירה הנקייה. צבע שתי העמודות האחרונות מעמיק ככל שהציפוף גדל.

מכתשים	קטבים / צדדים	קטבים / קצוות	צורה $a:b:c$	כיפות/חגורה חזוי	כיפות/חגורה נמדד (נקי)
$20 \geq$ ק"מ	1.12	1.30	1.37 : 1.15 : 1	1.21	1.19
$40 \geq$ ק"מ	1.11	1.53	1.68 : 1.13 : 1	1.28	1.39
100–60 ק"מ	1.19	1.78	2.07 : 1.22 : 1	1.42	1.53
300–60 ק"מ	1.28	1.73	1.96 : 1.34 : 1	1.48	1.61
300–100 ק"מ	1.58	1.61	1.76 : 1.75 : 1	1.64	1.84

ששת הכיפות כצורה: היחסים שנמדדו, הצורה התלת-צירית שהם נותנים, והתחזית שלה לספירה הנקייה.

למכתשים של 20 ק"מ ומעלה הצורה 1.37 : 1.15 : 1, שנקראת מששת הכיפות, חוזה 1.21 על האזורים הנקיים, והספירה הנקייה מודדת 1.19 (1.20 ± 0.05 ב-D.1): שני אזורים של פני השטח מסכימים דרך צורה אחת, בלי שום כיוונון. פיזור הספירה של הצורה הזו קטן (טווח 16%–84%: a/c 1.30–1.48, b/c 1.08–1.22). למכתשים הגדולים הוא רחב: כל כיפה מכילה רק 13–68 מכתשים של 100–60 ק"מ, והצורה מתפזרת על a/c 1.63–2.87 ו- b/c 1.02–1.46. לכן צורת השיא נקראת על משפחה של צורות, $a:b:c = a/c : 1 + f(a/c - 1) : 1$, כאשר f הוא החלק מעודף הציר הארוך שגם הציר הבינוני נושא — $f = 0$ ביצה טהורה, $f = 1$ פיתה טהורה. לכל f נבחר ה- a/c שנותן את היחס הנקי של המכתשים של 100–60 ק"מ, כשהכיפה התת-ארצית מוצאת מן החגורה בנתונים ובמודל כאחד, משום שדיסקת המגע דילדלה אותה מסיבה שאינה הצורה (100–60 ק"מ: 1.44 על החגורה הזו):

$f = (b - c) / (a - c)$	צורה $a:b:c$	ששת הכיפות של הצורה: קטבים/צדדים, קטבים/קצוות
0.19	2.34 : 1.25 : 1	1.22 / 1.95
0.35	1.95 : 1.33 : 1	1.28 / 1.72
0.50	1.78 : 1.39 : 1	1.32 / 1.61
0.60	1.70 : 1.42 : 1	1.34 / 1.55
0.70	1.64 : 1.45 : 1	1.36 / 1.51
1.00	1.52 : 1.52 : 1	1.41 / 1.42

משפחת הצורות שנותנות את היחס הנקי של המכתשים של 100–60 ק"מ, וששת הכיפות שכל אחת מהן הייתה משאירה.

ששת הכיפות שנמדדו נותנות 1.19 / 1.78 ל-60–100 ק"מ ו-1.28 / 1.73 ל-60–300 ק"מ. הצורות עם f בין 0.35 ל-0.6 נמצאות בתוך פיזור הספירה גם של ששת הכיפות וגם של החגורה הנקייה; מרכזן **בערך 1.8 : 1.4 : 1.1**, מתון: a/c 1.95–1.6, b/c 1.45–1.33. על החגורה הנקייה המלאה אותן צורות נותנות 1.49–1.45 מול ± 1.53 . הכיפה המאספת נושאת עודף שאינו של הצורה (A.9.1–A.9.4), ולכן ממוצע הצדדים גבוה במקצת ו- b/c נמוך במקצת; הדבר אינו משנה את הקריאה. תורת הגאות הלינארית לבדה הייתה נותנת f של 0.25–0.22 סמוך לקו; ה- f הגדול יותר שנמדד פירושו שחלק הביצה נבלם ביחס לפחיסות הסיבוב, כפי שבסיס שריסן את המתיחה היה עושה (C.6).

במספרים. יהיו לגוף הפחוס חצאי צירים a, b, c . החישוב מפריד בין שינוי הצורה לשינוי הגודל. שינוי הצורה נלקח בנפח קבוע, לכדור ברדיוס $R_s = (abc)^{1/3}$; הגוף בכללו גם התכווץ כשהתעגל — הנפח שלו ירד בערך פי 1.5 כשהמתיחה השתחררה — וההתכווצות המשותפת הזו מכפילה כל רכיב של פני השטח באותו גורם, ולכן אינה משנה שום יחס (מטופל להלן). ניקח עיוות הומוגני שמעביר את הצורה האחת לשנייה — כל קואורדינטה לאורך הציר הארוך מוכפלת ב- a/R_s , לאורך הציר האמצעי ב- b/R_s , לאורך הציר הקצר ב- c/R_s , כאילו הצורה צוירה על יריעת גומי והיריעה נמתחה באופן אחיד. רכיב שטח שהנורמל החיצוני שלו על האליפסואיד (החץ בעל אורך היחידה שניצב למשטח) הוא $\hat{n} = (n_x, n_y, n_z)$ משנה אז את שטחו בגורם:

$$\frac{dA_{\text{sphere}}}{dA_{\text{flat}}} = \sqrt{\left(\frac{a}{R_s}\right)^2 n_x^2 + \left(\frac{b}{R_s}\right)^2 n_y^2 + \left(\frac{c}{R_s}\right)^2 n_z^2},$$

ומכתשים שנוצרו באופן אחיד על פני השטח הפחוסים משנים את צפיפותם בהופכי של הגורם הזה — אותם מכתשים על כתם קטן יותר עומדים קרוב יותר זה לזה.

לנוסחה משמעות פשוטה. כתם הפונה לאורך ציר אחד שוכב לרוחב שני הצירים האחרים; שטחו משתנה במכפלת המתיחות לאורך שניהם, ומכיוון שמכפלת שלוש המתיחות היא 1 (בשלב הצורה הנפח אינו משתנה), הדבר שווה להופכי של המתיחה לאורך הציר שהכתם פונה אליו. בקוטב ($n_z = 1$) הגורם הוא c/R_s , הקטן ביותר: פני השטח מתכווצים יותר מכל, במידה שווה בכל כיוון משיקי, והצפיפות עולה ב- R_s/c . בנקודה שמתחת לכדור הארץ ($n_x = 1$) הגורם הוא a/R_s , הגדול ביותר: פני השטח מתכווצים פחות מכל, והצפיפות שם הנמוכה ביותר, R_s/a . בין הקוטב למשווה ההתכווצות נחלשת ברציפות, ולכן ההתכווצות הגדולה ביותר בקוטב עצמו והיא נחלשת ככל שמתרחקים ממנו — וזו הסיבה שהצפיפות בקוטב הצפוני עולה לעבר נקודת הקוטב (A.6).

הגוף שנפחוס. לספרואיד ($a = b$) תנאי הנפח נותן $R_s^3 = a^2 c$, ושני קצות קו האורך נובעים ישירות. ביחס לשינוי של פני השטח בכללם, המשטח הקוטבי משתנה ב- $c/R_s = (c/a)^{2/3}$: הוא מתקצר בשני הכיוונים לאורך הקרקע, כל אחד ב- $(c/a)^{1/3}$. המשטח המשווני משתנה ב- $a/R_s = (a/c)^{1/3}$: מתקצר מזרח-מערב ב- $(c/a)^{1/3}$ ומתקצר פחות צפון-דרום — המשטח המתכווץ פחות מכל בגוף. זה מול זה, ובלי קשר להתכווצות המשותפת, הקטבים נסגרים יותר מכל והמשווה פחות מכל. בתמונה של הכדור הלוחץ: כשמרימים את כפות הידיים, החלק העליון הרחב והשטוח נאסף פנימה מכל צד, ואילו החגורה סביב המותניים נאספת רק מעט. צפיפות המכתשים משתנה בכיוון ההפוך — עולה יותר מכל בקוטב, ב- R_s/c ביחס לשלם, ופחות מכל במשווה, ב- R_s/a — והיחס ביניהן, הציפוף של הקוטב לעומת המשווה, הוא:

$$\frac{R_s/c}{R_s/a} = \frac{a}{c}.$$

גודל הכדור מתבטל: הציפוף בנקודת הקוטב לעומת המשווה הוא בדיוק יחס הצירים של הצורה הפחוסה. לדוגמה, גוף שהיה רחב פי 1.69 מגובהו משאיר את המכתשים שנוצרו עליו צפופים פי 1.69 בנקודת הקוטב מאשר במשווה. כשמבצעים ממוצע על פני האזורים הסופיים שבהם סופרים מכתשים, היחס קטן יותר, כי ההתכווצות נחלשת ככל שמתרחקים מן הקוטב.

הגוף התלת-צירי. לצורה $a:b:c$ של השיא אותה נוסחה נקראת בשלוש נקודות: הצפיפות עולה ב- R_s/c בקוטב, ב- R_s/b בצדדים וב- R_s/a בקצות קו כדור הארץ, כל אחד ביחס לפני השטח בכללם. הקוטב מצטופף יותר מכל, הצדדים אחריו, קצות קו כדור הארץ פחות מכל — הסדר של ששת הצירים (A.9). הציפוף של הכיפות לעומת החגורה הוא שוב יחס, ושוב גודל הכדור מתבטל ממנו: הוא תלוי בצורה בלבד.

לרכיבי הצורה:

תוצאה

לצורת השיא (תלת-צירית, נקראת מן המכתשים הגדולים, C.1): $1.8:1.4:1 \rightarrow 1.49$ (מחושב ל-1.75: 1.45 : 1, מרכז המשפחה; 1.8 : 1.4 : 1 עצמה נותנת 1.48). לצורה של כל המכתשים של 20 ק"מ ומעלה, שנקראת מששת הצירים (A.9): $1.37:1.15:1 \rightarrow 1.21$, מול 1.19 שנמדד. בהתעגלות, אחרי שחלק הביצה השתחרר, צורת הסיבוב: 1.34 $\rightarrow$ 1.40; 1.26 $\rightarrow$ 1.30; 1.17 $\rightarrow$ 1.20; 1.0 $\rightarrow$ 1.0 (כיפות של 30° לעומת החגורה $|\phi| < 15^\circ$, על האזורים הנקיים של D.1).

להשוואה: הצורה הפחוסה שגוף נזולי של 1,300 ק"ג/מ"ק היה מקבל מן הסיבוב לבדו, 1.59 $\rightarrow$ 1.69; הצורה הגאותית החופשית של סעיף C.2 (המחשה לחלקה של הגאות): קוטב 1.208 $\times$, הנקודה שמתחת לכדור הארץ 0.726 $\times$; כיפות לעומת חגורה 1.24.

התחזית היא טווח שעולה ככל שהמכתשים נוצרו קרוב יותר לשיא: כ-1.5 לאלה שנוצרו בשיא, כ-1.2 לאלה שנוצרו מאוחר בהתעגלות, 1.0 לאלה שנוצרו על הגוף העגול, מן השחרור והלאה. ספירה נקייה (D.1): 0.05 ± 1.20 .

את תיבת התוצאה קוראים כשעון. כל צורה בדרך מטה מן השיא היא רגע בהתעגלות, והמספר שאחרי החץ הוא הציפוף שיתרת ההתעגלות משאירה על מכתשים שנוצרו באותו רגע: ככל שהמכתש נוצר קרוב יותר לשיא, כך הוא עבר יותר התעגלות, והאוכלוסייה שלו צפופה יותר בקטבים. מאחר שחומר הושלך גם במהלך הפחיסות, צורה בפחיסות נתונה נעברה גם בדרך מעלה אל השיא וגם בדרך מטה; מכתש גדול וצפוף יותר נוצר קרוב יותר לשיא, ולא בהכרח מוקדם יותר. ערכי הכיפות לעומת החגורה נמוכים במעט מיחסי הצירים, כפי שהממוצע על פני אזורים מחייב. הספירה הנקייה — כשהימות ו-South Pole-Aitken מוצאים משני הצדדים, כך שהקוטב והחגורה מושווים באופן שווה (D.1) — נופלת בתוך הטווח החזוי.

הממוצעים הם אינטגרלים שטחיים של גורם הצפיפות על פני אזורי הספירה, $J(\lambda, \phi) = R_s \left[\cos^2 \lambda \left(\cos^2 \phi / a^2 + \sin^2 \phi / b^2 \right) + \sin^2 \lambda / c^2 \right]^{1/2}$, כאשר λ ו- ϕ הן הקואורדינטות הזוויתיות של נקודה על פני השטח; J הוא גורם הצפיפות של הנוסחה שלמעלה, כתוב כפונקציה של המיקום. הם חושבו על רשת של 0.05° ובאינטגרציה ישירה, ושתי הדרכים מתאימות בטווח של 10^{-7} ; הקוד נמצא בחבילת השחזור. צורת השיא נקראת מן המכתשים הגדולים סביב ששת הצירים, וחלק הסיבוב שלה מתאים ליחס מקלורן בקצב הסיבוב של מאמר 2 לצפיפות שירידת הנפח מתירה (C.1); הצורה של האוכלוסייה כולה, שנקראת באותה דרך, חוזה את היחס הנקי בלי שום כיוונון. המתיחה לאורך הקו אל כדור הארץ בין שתי המשיכות המנוגדות היא עכשיו חלק מן הצורה — חלק הביצה שלה — הנקרא מן המכתשים ולא מחושב, כי הגאות על גוף המוחזק בבסיסו לא חושבה. המכתשים הגדולים ביותר, עם 1.84 ± 0.38 (D.2), קוראים צורה שמעבר לשיא, בתוך השגיאה הרחבה שלהם. המכתשים עצמם אינם מתכווצים עם פני השטח: הם נישאו על קליפה קשיחה, כמו אריחים על רצפה שנדחסת בתפרים, וההתכווצות סגרה את הרווחים שביניהם (C.7, D.2).

הקטבים נסגרים יותר מכל. שינוי הצורה אינו השינוי היחיד בגודל. הגוף המתוח היה גדול וקל מן הגוף הרפוי; שחרור המתיחה עשה אותו קטן וצפוף יותר. מכ-1,700 ל-2,600 ק"ג/מ"ק הנפח יורד בערך פי 1.5 (1.53) והרדיוס

השקול ב-13%, מכ-2,180 ל-1,890 ק"מ; פני השטח הממוצעים יורדים ברבע. התכווצות משותפת מקטינה כל רכיב של פני השטח באותו גורם; היא מעלה את צפיפות המכתשים בכל מקום באותה מידה ואינה משנה שום יחס. הטבלה נותנת את שני החלקים יחד, לצורת השיא (מחושב ל-1.75 : 1.45 : 1) ולצפיפות שיא של 1,700 ק"ג/מ"ק. השורות הכחולות הן גורמי שטח, כהות יותר היכן שפני השטח נסגרים יותר; השורה הכתומה היא הציפוף שהמבחן קורא.

התעגלות מצורת השיא בכ-1,700 ק"ג/מ"ק לכדור	גורם	ב-2,600
פני השטח הממוצעים של הגוף (ירידת הנפח)	$\times 0.75$	
פני השטח בקוטב	$\times 0.55$	
פני השטח בצדדים (מוביל, מאסף)	$\times 0.80$	
פני השטח בקצות קו כדור הארץ	$\times 0.97$	
פני השטח של הכיפות הקוטביות, לעומת חגורת המשווה	$\times 0.67$ (0.58 / 0.86)	
צפיפות המכתשים, כיפות לעומת חגורה	$\times 1.49$	

ההתעגלות מצורת השיא בירידת נפח: גורמי השטח בקוטב, בצדדים ובקצות קו כדור הארץ, והציפוף שהמבחן קורא.

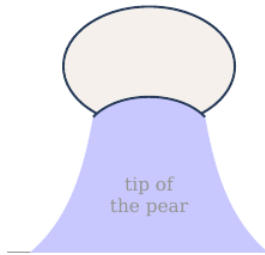
קראו את הטבלה מלמעלה למטה: הקוטב נסגר יותר מכל, הצדדים אחריו, קצות קו כדור הארץ פחות מכל — הסדר של ששת הצירים. בגאומטריה הזו הקטבים עומדים כמעט במקומם (הרדיוס הקוטבי גדל בכ-290 ק"מ בזמן שהגוף בכללו מתכווץ), וכל השאר נע פנימה לעברם: הצדדים בכ-430 ק"מ, קצות קו כדור הארץ בכ-900 ק"מ. זה הבלון של המבוא: שני הקצוות עומדים, והשאר נאסף לעברם. בצפיפות שיא מתחת לכ-1,800 ק"ג/מ"ק (1,790 לצורה הזו) כל חלק של פני השטח נסגר; מעליה קצות קו כדור הארץ היו צריכים לגדול, וזו הבדיקה השנייה של צפיפות השיא ב-C.1. המבחן, עם זאת, אינו נשען על הגורמים המוחלטים האלה, שתלויים בצפיפות בשיא. הוא נשען על היחס של שתי השורות האחרונות, שזהה בכל צפיפות שיא — 1.49 לצורת השיא, 1.21 לצורה של כל המכתשים של 20 ק"מ ומעלה, 1.59 לצורה הפחוסה 1.69 — כי ההתכווצות המשותפת מתבטלת ממנו. הטענה של המאמר הזה היא היחס הזה: הקטבים מצטופפים יותר מכל והמשווה פחות מכל; היא אינה זקוקה לשום קביעה כמה התכווץ המשווה עצמו. (צורה בעלת חוזק הייתה נפחסת פחות ונותנת גורמים קטנים יותר; הדבר מושאר לסעיף E.3).

איור 10 מרכז את הסעיף בתמונה אחת. התבוננו בנקודות: מפוזרות באופן אחיד על הגוף הפחוס, הן מקובצות בשני הקטבים האדומים כשהגוף נעשה עגול.

red = the poles · green = Earth-Moon line · dots = craters

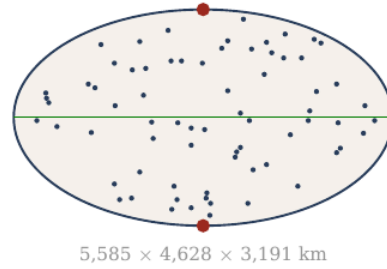
1. Tip of the pear

a mass gathered at the tip of the pear held by the wide, curved base



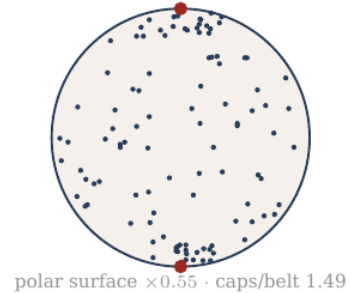
2. Peak flattening

a body of its own, attached, near the line craters uniform · $a : b : c \approx 1.8 : 1.4 : 1$ stretched and swollen, $\sim 1,700 \text{ kg/m}^3$



3. Rounded

past the line · smaller, denser poles crowded · round at release (rigid shell) · 3,778 km



distance from the Earth → (not to scale)

איור 10. צורת הירח בשלושה שלבים: מסה שהתאספה בקצה האגס, מוחזקת בבסיסה הרחב והמעוקל; בשיא הפחיסות, כשהתקרב לבסיס של 3,000 ק"מ סמוך לקו הקורוטציה — גוף משלו, עדיין מחובר, מתוח בין הכבידה של כדור הארץ על הצד הקרוב שלו למשיכה הצנטריפוגלית של הקורוטציה — תלת-צירי, $a : b : c \approx 1.8 : 1.4 : 1$, נראה כאן מן הצד, כשקו כדור הארץ אופקי — כשהמכתשים מפוזרים עליו באופן אחיד; ועגול, קטן וצפוף יותר, לאחר שמרכז המסה שלו עבר את הקו, כשהמכתשים שנוצרו על הגוף הפחוס מצטופפים בשני הקטבים. הנקודות להמחשה; המספרים הם אלה של סעיפים C.1 ו-C.3. הקטרים של הגוף בשיא (לאורך קו כדור הארץ, לאורך המסלול ודרך הקטבים) מחושבים לצורה $1 : 1.45 : 1.75$ ולמסת הירח בכ-1,700 ק"ג/מ"ק (רדיוס שקול כ-2,180 ק"מ), והגוף העגול ב-2,600 ק"ג/מ"ק; הטענה של המאמר נשענת על היחס בין הקוטב למשווה, שאינו תלוי בגודל הכולל. (בתרשים: ציר אופקי — המרחק מכדור הארץ, לא בקנה מידה; אדום — הקטבים; ירוק — הקו בין כדור הארץ לירח; נקודות מכתשים. שלב 1, "קצה האגס": מסה שהתאספה בקצה האגס, מוחזקת בבסיסה הרחב והמעוקל. שלב 2, "שיא הפחיסות": גוף משלו, מחובר, סמוך לקו; מכתשים אחידים, $a : b : c \approx 1.8 : 1.4 : 1$; מתוח ונפוח, כ-1,700 ק"ג/מ"ק; $5,585 \times 4,628 \times 3,191$ ק"מ. שלב 3, "מעוגל": מעבר לקו, קטן וצפוף יותר, קטבים צפופים, עגול ברגע השחרור (קליפה קשיחה), 3,778 ק"מ; המשטח הקוטבי $\times 0.55$, כיפות/חגורה 1.49).

מה שיש בידינו עכשיו: גוף פחוס שמתעגל בירידת נפח סוגר את המשטח הקוטבי שלו יותר מכל ואת המשווה שלו פחות מכל; מכתשים שנוצרו לפני ההתעגלות מסיימים מצטופפים בקטבים בגורם שנקבע על ידי הצורה בלבד — כ-1.5 עד 1.2 על פני הכיפות הנספרות, לפי כמה קרוב לשיא הם נוצרו — והצורה שששת הצירים רושמים לכל המכתשים של 20 ק"מ ומעלה חוזה את העודף שנמדד.

C.4 הכבידה כמנוע, והלחץ שהיא בונה

סעיפים C.1 עד C.3 תיארו את ההתעגלות; סעיף זה אומר מה הניע אותה, כמה אנרגיה היא שחררה, ומה עשתה בתוך הגוף. התשובה היא שאין צורך בכוח חדש: על קו הקורוטציה הגוף מפסיק להיות לחוץ על הבסיס שלו, והכבידה של הגוף עצמו, שמתחזקת ככל שהגוף נדחס, מעגלת אותו — ומכיוון שהקליפה החיצונית קשיחה, ההתעגלות גם בונה בפנים לחץ שבורח דרך הפתחים שכבר קיימים.

מה מעגל את הגוף בזמן שהוא עדיין מסתובב עם כדור הארץ. את הפחיסות החזיקו שתי המשיכות המנוגדות לאורך הקו אל כדור הארץ — הכבידה של כדור הארץ על הצד הקרוב, פנימה, והמשיכה הצנטריפוגלית של הקורוטציה, החוצה — יחד עם הסיבוב, בזמן שהגוף היה לחוץ על הבסיס שלו. שני החלקים שלה השתחררו בשתי דרכים. חלק הביצה, המתיחה לאורך הקו אל כדור הארץ, הוחזק כל עוד הגוף היה לחוץ על הבסיס שלו; על קו הקורוטציה הלחיצה הזו ירדה לאפס והפכה למשיכה הרחק מן הבסיס, הלחץ מלמטה ירד, וחלק הביצה השתחרר (C.6). חלק הפיתה, פחיסות הסיבוב, שוחרר בידי הכבידה של הגוף עצמו. ברגע שמרכז המסה עבר את הקו, מה שנותר לקבוע אותו הוא הכבידה של הגוף עצמו מול הסיבוב שלו. הסיבוב כמעט אינו משתנה — יממת כדור הארץ מתארכת מ-5.5 ל-5.77 שעות — בעוד הצפיפות עולה מכ-1,700 ל-2,600

ק"ג/מ"ק כשהמתיחה משתחררת והנפח יורד. המדד של הסיבוב לעומת הכבידה העצמית של הגוף, $\Omega^2 / (\pi G \rho)$, האגף השמאלי של היחס בסעיף C.1, יורד מ-0.28 ל-0.17, וצורת הסיבוב של שיווי המשקל של סעיף C.1 יורדת יחד איתו, מ-1.41 ל-1.20. הכבידה היא המנוע של חלק הפיתה: אותו סיבוב כבר אינו יכול להחזיק צורה פחוסה כנגד המשיכה של גוף צפוף יותר. מחליקה שמסתובבת בזרועות פרושות ואז נעשית כבדה יותר, בלי להסתובב מהר יותר, אינה יכולה להחזיק את זרועותיה פרושות באותה מידה. עד השחרור הגוף היה עגול וקליפתו קשיחה (מאמר 2, B.7§). אחרי השחרור הסיבוב הנעול מאט יחד עם המסלול — 14 שעות ב-30,000 ק"מ, 41 שעות ב-60,000 ק"מ — ומה שהולך איתו הוא רק הבליטה הגאותית והסיבובית הקטנה של הגוף הקשיח (C.5), לא הפחיסות המוקדמת.

המדרון. על צורה פחוסה שכבר אינה בשיווי משקל הקוטב הוא הנקודה הנמוכה של הפוטנציאל: הפחיסות שהסיבוב החזיק בצפיפות הנמוכה גדולה ממה שהוא יכול לשאת בצפיפות הגבוהה, לפני השטח זורמים במורד המדרון הזה — מן המשווה לעבר הקטבים, לאורך כל קו אורך. חשבו על קערה של דבש סמיך שהוטתה ואז הוחזרה למצב מאוזן: הדבש זז עד שפניו שוב שטוחים, בלי שום דחיפה מלבד משקלו שלו. הזרימה הזו היא ההתעגלות; אין כוח נוסף מעליה. סעיף B.4 הראה את ההפך בזמן שהצורה הייתה בשיווי משקל עם הסיבוב: במערכת המסתובבת הקוטב עמד כ-120 ק"מ מעל המשווה. דבר לא השתנה בכבידה בין שני המצבים; מה שהשתנה הוא כמה היא חזקה לעומת הסיבוב.

האנרגיה. משתחררים שני איברים. הראשון הוא שינוי הצורה: ההתעגלות מורידה את האנרגיה הכבידתית של הגוף מזו של הצורה הפחוסה לזו של כדור בעל אותו נפח. לספרואיד פחוס בעל אקסצנטריות e , כמו $a/c = 1.69$:

$$W_{\text{spheroid}} = -\frac{3GM^2}{5R_s} \frac{\arcsin e}{e} (1 - e^2)^{1/6}, \quad W_{\text{sphere}} = -\frac{3GM^2}{5R_s}.$$

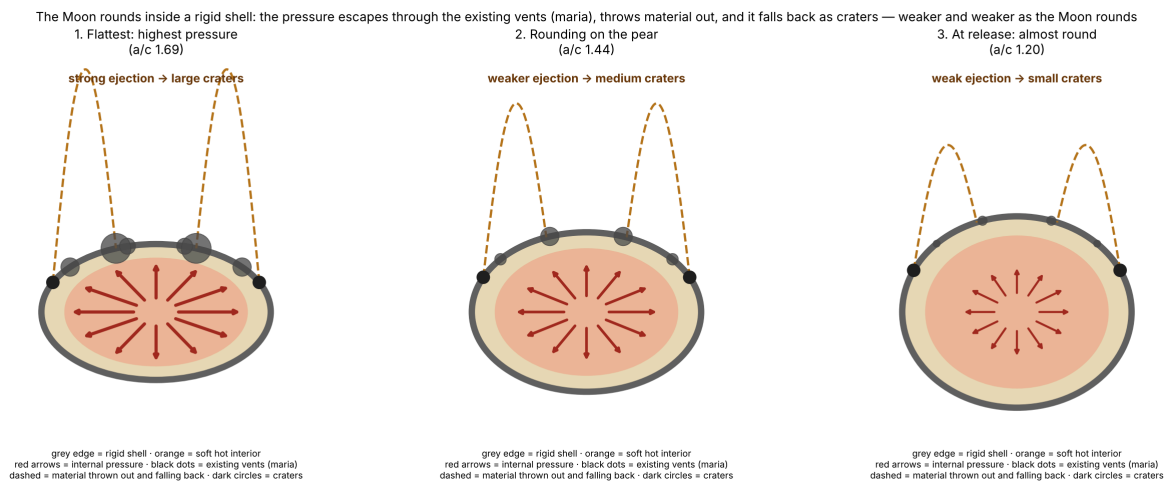
W היא האנרגיה הכבידתית של הגוף — העבודה שהייתה נדרשת כדי לפרק אותו ולהרחיק כל חלק למרחק גדול, הנספרת כשיליתית כי הגוף קשור; כאן M היא מסת הגוף ו- R_s רדיוס הכדור בעל אותו נפח. לכדור הגורם שאחרי GM^2/R_s הוא $3/5$; הצורה הפחוסה נושאת גורם נוסף, קטן במעט מ-1, שתלוי רק באקסצנטריות שלה. הכדור הוא הצורה הקשורה ביותר שיכולה להיות לגוף, ולכן המעבר מספרואיד לכדור משחרר אנרגיה, כפי שאבן המורדת לבור משחררת. ל-1.69 הפחוסה ההפרש הוא 2×10^{27} ג'אול — 2.4% מאנרגיית הקשר של הגוף, 3×10^4 ג'אול לק"ג (ב-1,300 וב-2,600 ק"ג/מ"ק). לצורת השיא התלת-צירית (1.75 : 1.45 : 1, מן הביטוי הכללי לאליפסואיד) הוא כ- 2×10^{27} ג'אול — 2.1% מאנרגיית הקשר, כ- 3×10^4 ג'אול לק"ג (2.1– 2.4×10^{27} ג'אול ב-1,700 וב-2,600 ק"ג/מ"ק). אם הוא משתחרר כחום בפנים הצמיג — הפנים שזורם לאט, כמו זפת סמיכה — הוא היה מחמם את הגוף בכ-30 קלווין: די כדי לשמור על פנים נייד כנייד, לא די כדי להתיק קליפה.

האיבר השני הוא ירידת הנפח. אנרגיית הקשר של כדור, $-3GM^2/5R$, מעמיקה כשהרדיוס שלו קטן. מכ-1,700 ל-2,600 ק"ג/מ"ק הרדיוס יורד מכ-2,180 ל-1,890 ק"מ, והאנרגיה המשתחררת היא 1.5×10^{28} ג'אול, 2.1×10^5 ג'אול לק"ג — בערך פי שבעה מאיבר הצורה, ודי כדי לחמם את הגוף בכ-200 מעלות צלזיוס בממוצע על פני הגוף (206 קלווין בקיבול חום של 1 קילו-ג'אול לק"ג לקלווין). קפיץ שמשחררים אותו מחזיר את העבודה שהחזיקה אותו מתוח; כאן העבודה חוזרת כחום וכלחץ. זהו מקור חום ומקור לחץ בזמן ההתעגלות: הוא שומר את הפנים נייד, והוא מזין את פתחי איורים 11–12 יחד עם אי ההתאמה של הקליפה. ההתעגלות אינה דורשת מקור מעבר לצורה הפחוסה והמתוחה עצמה.

הקליפה מתנגדת, והלחץ בורח. הפנים מתעגל; הקליפה החיצונית, קשיחה מספיק כדי לשמור על מכתשיה (C.7), אינה הולכת אחריו בחופשיות. קליפה שנאלצת לשנות את צורתה מצורת השיא לעבר הכדור עוברת עיבור — שינוי צורה כשבר מאורכה — של עשרה עד עשרים אחוזים. בקשיחות של קליפה מוצקה, עשרות ג'יגה-פסקל, זה מאמץ של 2 עד 12 ג'יגה-פסקל, לעומת חוזק של חומר הקליפה של כ-0.1 ג'יגה-פסקל: פי עשרים עד פי מאה ועשרים ממה שהקליפה יכולה לשאת. הקליפה אינה יכולה להחזיק בו — ואין לה צורך להישבר כדי לשחרר אותו:

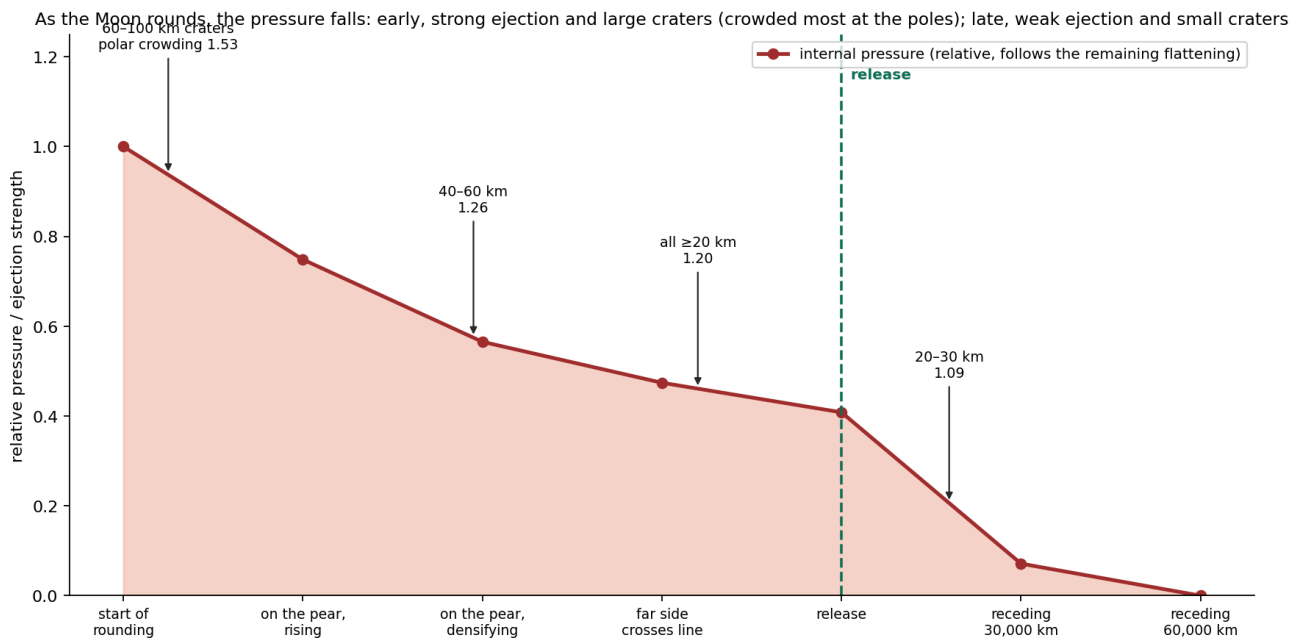
הלחץ של הפנים בורח דרך הפתחים שכבר קיימים, פתחי הימות (מאמר 5). דמיינו בקבוק בעל מילוי רך ועור קשיח עם כמה חורים, שנלחץ ביד: המילוי ניתז מן החורים, בעוצמה כל עוד הלחיצה חזקה ובחולשה רבה יותר כשהיא מרפה. חומר נזרק החוצה דרך הפתחים ונופל בחזרה על הקליפה כמכתשים (מאמר 6) — חומר חוזר שנוחת על פני השטח. הלחץ הגדול ביותר כשהצורה הפחוסה ביותר, והוא יורד ככל שהגוף מתעגל: מוקדם, פליטה חזקה ומכתשים גדולים; מאוחר, פליטה חלשה ומכתשים קטנים (איורים 11–12). המכתשים שנוצרו מאוחר יותר קטנים יותר אפוא, כי הלחץ שזרק את החומר שלהם כבר ירד. זו הסיבה הפיזיקלית לכך שגודל מכתש הוא שיעון (C.5, D.2): המכתשים הגדולים ביותר נוצרו כשהגוף היה הפחוס ביותר, והם עברו את רוב ההתעגלות אחר כך — ולכן הציפוף בקטבים עולה עם גודל המכתש.

איור 11 מראה את המנגנון בחתך: הקליפה הקשיחה, הפנים הרך שלוחץ עליה, והפתחים שדרכם הלחץ בורח, בשלושה רגעים של ההתעגלות.



איור 11. הירח מתעגל בתוך קליפה קשיחה. הלחץ של הפנים הרך בורח דרך הפתחים הקיימים (הימות), זורק חומר החוצה, והחומר נופל בחזרה כמכתשים — פליטה חזקה ומכתשים גדולים בשלב הפחוס ביותר, חלשה יותר כשהוא מתעגל, חלשה מאוחר בהתעגלות, סמוך לשחרור. הלוחות נושאים את התוויות הקודמות "Rounding on the pear" ו-"At release: almost round" לשני השלבים האלה של ההתעגלות, ואת הסולם הפחוס של גרסה קודמת (a/c 1.69, 1.44, 1.20): יש לקרוא אותם כצורת השיא (כ-1.8 : 1.4 : 1), ההתעגלות אחרי שחלק הביצה השתחרר (1.40), ומאוחר בהתעגלות (1.20). סכמטי.

איור 12 נותן את אותו רצף כעקומה. הלחץ נלקח כמי שהולך בעקבות אי ההתאמה בין המשטח הקוטבי שעדיין יש לקליפה לבין זה שהפנים היה מקבל ככדור, $1 - (c/a)^{2/3}$ — השבר שבו המשטח הקוטבי עדיין צריך להתכווץ. העקומה משורטטת על הסולם הפחוס של גרסה קודמת; השיא התלת-צירי משנה את ערכיה, לא את סדרה, וחום הדחיסה שלמעלה מוסיף מקור שני שעשוי לשאת חלק מן הלחץ של הפתחים. הוא הגדול ביותר בשיא הפחיסות ויורד לאפס בכדור. לצד כל שלב עומדים גודלי המכתשים שהציפוף הקוטבי הנקי שלהם מצביע על השלב הזה: המכתשים הגדולים ביותר על הרגע הפחוס ביותר, הקטנים יותר על רגעים מאוחרים יותר.



איור 12. הלחץ הפנימי לאורך שלבי ההתעגלות, ביחס לערכו בשיא הפחיסות (הוא הולך בעקבות אי ההתאמה הקוטבית שנותרה, עם גודלי המכתשים שהציפוף הקוטבי הנקי שלהם מצביע על כל שלב (D.2). תוויות הציר באיור שומרות את השמות הקודמים ואת הסולם הפחוס של השלבים: "start of rounding" ($1.69 a/c$) הוא שיא הפחיסות, כ-1.4 : 1.8, סמוך לקו הקורוטציה; "on the pear, rising", "on the pear, densifying" ו-"far side crosses line" הם שלבי ההתעגלות, בקריאה 1.30, 1.40 ו-1.24.

היכן זה נעצר. כשהגוף הוא כדור, פני השטח שלו שווים פוטנציאל, אין מדרון, אי ההתאמה נעלמה ועמה הלחץ, והזרימה נעצרת. התכווצות המשטח הקוטבי היא הצורה שההתעגלות לובשת, והקוטב הוא הנקודה שההתכווצות מתכנסת אליה משום שציר הסיבוב עובר דרכו (C.3).

מה שיש בידינו עכשיו: שני שחרורים — הלחיצה על הבסיס, שאבדה על קו הקורוטציה, לחלק הביצה, והכבידה של הגוף עצמו, שגדלה ככל שהוא נדחס, לחלק הפיתה — שמעגלים את הגוף, משחררים חום מתון משינוי הצורה וחום גדול יותר מירידת הנפח, ודוחפים החוצה דרך הימות לחץ שיוורד ככל שההתעגלות מתקדמת — מכתשים גדולים סמוך לשיא, קטנים מאוחר.

5.C המתיחה בזמן: מתי התחילה, מתי הייתה הגדולה ביותר, כיצד דעכה, ומתי הושלם הכדור

סעיפים C.1–C.4 נתנו את הצורות ואת המנוע; סעיף זה מציב אותם על ציר זמן. השאלה שהוא עונה עליה פשוטה: בכל רגע של השלב המחובר, כמה חזק משך כדור הארץ את הגוף אל מחוץ לצורתו, מה החזיק אותו יחד, ועד כמה היה פחוס? התשובות קובעות על איזו צורה נוצר כל מכתש, ולכן כמה צפיפות יתר צריכה כל קבוצת מכתשים לשאת היום.

לפני השחרור — יותר ממה שגוף חופשי יכול לשאת. כדור הארץ מושך את הצד הקרוב של הגוף חזק יותר מאת הצד הרחוק שלו; ההפרש הזה הוא הגאות, והיא מנסה למתוח את הגוף לאורך הקו אל כדור הארץ. הכבידה של הגוף עצמו מנסה להחזיק אותו יחד. המדד של הגאות ביחס לכבידה העצמית של הגוף שמשמש במאמר זה הוא

$$k = \frac{\Omega^2}{\pi G \rho} = \frac{M_{\oplus}}{\pi \rho r^3},$$

כאשר r הוא המרחק בין המרכזים ו- ρ צפיפות הגוף. שתי הצורות נותנות אותו מספר: $\Omega^2 = GM_{\oplus}/r^3$ הוא ריבוע המהירות הזוויתית של מסלול מעגלי במרחק r , כך שהמונה מודד את משיכת כדור הארץ במרחק הזה, ו- $\pi G \rho$

מודד את המשיכה של גוף בצפיפות ρ על עצמו. מן הצורה השנייה נובעים שני דברים. גודל הגוף אינו נכנס לחשבון — רק המרחק והצפיפות שלו; והגאות יורדת בתלילות עם המרחק, כ- $1/r^3$, כך שהתרחקות מתונה מורידה אותה הרבה, והתהדקות (צפיפות ρ גדולה יותר) מורידה אותה עוד יותר.

גוף נוזלי חופשי — גוף ללא חוזק ושאין דבר מחובר אליו — מחזיק צורת שיווי משקל רק כל עוד $k < 0.09$. הסף הזה הוא גבול רוש: המרחק שבתוכו הגאות עולה על מה שהכבידה העצמית יכולה להחזיק, כך שגוף נוזלי חופשי נמתח ונקרע. גוף קשיח, שמתנגד לשינוי צורה, יכול להחזיק את עצמו קרוב יותר; הגבול שלו, גבול רוש הקשיח, נמצא ב-12,994 ק"מ לצפיפות של 1,300 ק"ג/מ"ק. בתוך הגבולות האלה הגוף שורד רק אם משהו אחר מחזיק אותו. לאורך השלבים המחוברים:

שלב	r (ק"מ)	k	צורה נוזלית חופשית?
מסה שהתאספה בקצה האגס (שלב 2), ב-1,300	8,991	2.01	לא — מוחזק על ידי הבסיס
גוף משלו, עדיין מחובר ונפחס (גבול רוש הקשיח), ב-1,300	12,994	0.67	לא — מוחזק על ידי הבסיס; העומס הגדול ביותר מאז שהגוף מחזיק את עצמו
הצד הרחוק חוצה את קו הקורוטציה, בפחיסות, בכ-1,500	14,100-כ	0.45	לא — מוחזק על ידי הבסיס
בהתקרבות לקו על הבסיס של 3,000 ק"מ, בכ-1,700 — שיא הפחיסות	<16,400	>0.25	לא — מוחזק על ידי הבסיס
מרכז המסה על הקו: הגוף מתעגל ומתחיל להיפרד; שחרור כ-210 ק"מ מעבר לו (5.77 שעות), ב-2,600; עגול ($a/c \leq 1.04$)	16,400	0.17	לא — מוחזק על ידי הקליפה הקשיחה שלו
שחרור ב- 22.5° , ב-2,600	17,287	0.14	לא — מוחזק על ידי הקליפה הקשיחה שלו
צורה נוזלית חופשית ב-2,600, מעבר לגבול הנוזלי (כ-20,000 ק"מ; לא מושגת לפני השחרור)	20,595	0.084	כן — גוף נוזלי יכול היה להחזיק את עצמו כאן
ענף ה-19,660, ב-2,600	19,660	0.096	לא (מאמר 4 דוחה את הענף הזה מאותה סיבה)

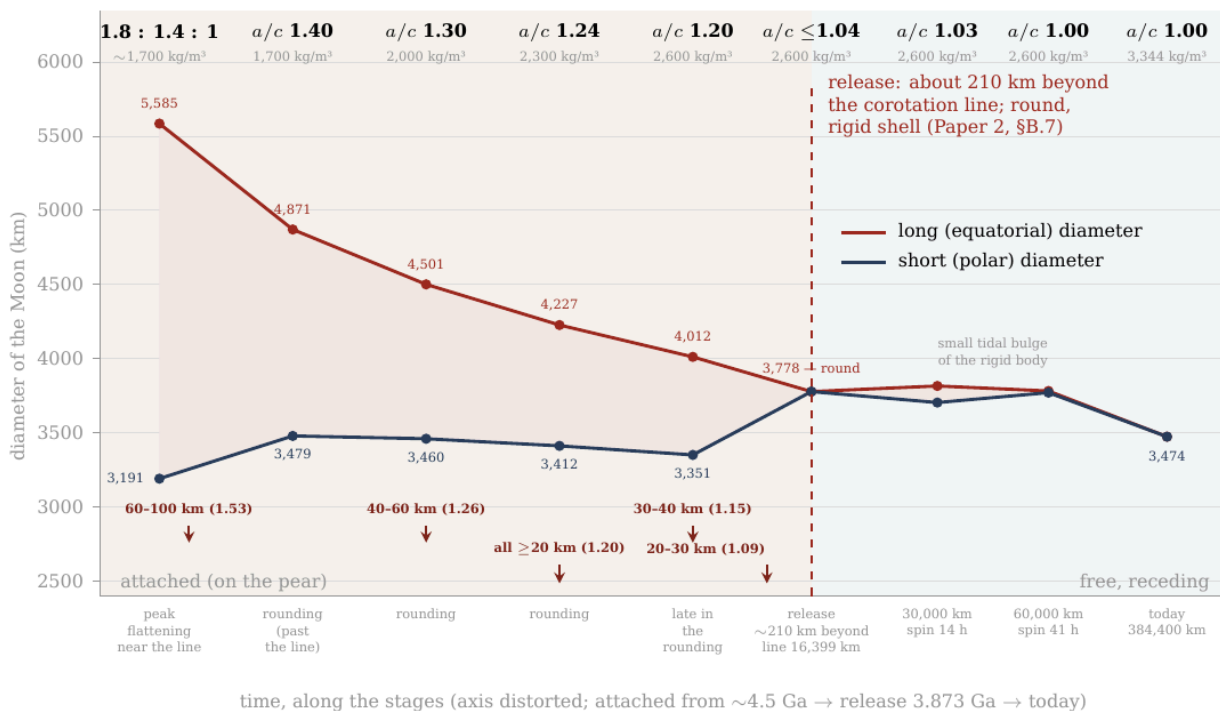
המדד k (גאות ביחס לכבידה עצמית) לאורך השלבים המחוברים, והשאלה אם גוף נוזלי חופשי היה מחזיק את עצמו בכל אחד מהם. הצפיפויות בק"ג/מ"ק.

הטבלה נקראת מלמעלה למטה ככל שהגוף נע החוצה. הסתכלו בעמודה השלישית: k יורד מ-2.01 ל-0.17. לאורך השלב המחובר, אבל אינו מגיע לעולם לסף הנוזלי של 0.09 לפני השחרור. כל שורה מעל שורת השחרור אומרת "מוחזק על ידי הבסיס"; מן השחרור והלאה הגוף מוחזק על ידי הקליפה הקשיחה שלו עצמו. רק מעבר לגבול רוש הנוזלי, כ-20,000 ק"מ (19,971 ק"מ, מאמר 2; $k = 0.09$ בכ-20,100 ק"מ), היה גוף נוזלי בצפיפות 2,600 ק"ג/מ"ק מחזיק את עצמו — ב-20,595 ק"מ, למשל (גרסה קודמת ראתה ב-20,595 ק"מ את המרחק

הראשון כזה); לענף ה-19,660 ק"מ, שנמצא בתוך גבול רוש הנוזלי לצפיפות הזו, אין צורה נוזלית, ומאמר 4 דוחה אותו מסיבה זו.

העומס על הבסיס גדול ביותר אפוא כשיש גוף משלו להעמים — בגבול רוש הקשיח, 12,994 ק"מ — פי שבעה ממה שגוף נוזלי חופשי יכול לשאת (0.67 לעומת 0.09). לפני הפחיסות המסה הייתה עדיין קצה האגס, וכדור הארץ קבע את צורתה; במהלך הפחיסות היא נעשתה גוף משלו, פחוס ועדיין מחובר. הגוף אינו נקרע כי הוא יושב על בסיס ברוחב 6,000 ק"מ, שנושא את מה שכבידתו שלו אינה יכולה לשאת; מאמר 3 דרש חיבור רחב לשם האיזון הרדיאלי, וכאן הוא נדרש גם כנגד הגאות. ככל שהגוף נפחוס ונע החוצה הבסיס שלו מצטמצם מ-6,000 ל-3,000 ק"מ, והעומס יורד עם המרחק (k מ-0.67 ל-0.17); וכשהגוף התהדק לצפיפות 2,600 ק"ג/מ"ק, הקליפה הקשיחה שלו נושאת את השאר. הוא מתחיל להיפרד כשמרכז המסה שלו מגיע לקו הקורוטציה — המרחק שבו גוף שמסתובב עם כדור הארץ כבר נע במהירות של מסלול חופשי, כלומר מסלול חופשי נמשך בדיוק כמו סיבוב אחד של כדור הארץ: כ-16,400 ק"מ במשוואה (16,399 ק"מ ביממה של 5.77 שעות), ו-17,287 ק"מ ב- 22.5° ($k \approx 0.17$ ו-0.14 בהתאמה) — ומשתחרר כ-210 ק"מ מעבר לו, לפני שגוף נוזלי בצפיפות הזו יכול היה להחזיק את עצמו (מעבר לכ-20,000 ק"מ, $k < 0.09$); זו הסיבה שהגוף חייב להיות קשיח ברגע השחרור (מאמר 2, §B.7). שני התנאים נפגשים: חישוב הגאות כאן וחישוב השחרור של מאמר 2 דורשים את אותו גוף קשיח, בדרכים שונות.

מקצה האגס אל הכדור. ברצף יש ארבעה רגעים. ראשית, מסה סיאלית התאספה בקצה האגס — עדיין קצה האגס — והחלה לצאת ולהיפחס, מחוברת על בסיס ברוחב 6,000 ק"מ. שנית, בין הבסיס של 6,000 ק"מ לבסיס של 3,000 ק"מ היא נפחסה ונעה החוצה, וקיבלה צורה וגוף משלה, נפרדת מן האגס אך פחוסה; מגבול רוש הקשיח לצפיפות 1,300 ק"ג/מ"ק, ליד 13,000 ק"מ, היא החזיקה צורה משלה. הפחיסות נוצרה כשהאגס הגיע לקורוטציה, משום ששני צדי הגוף נמשכו לכיוונים מנוגדים: הכבידה של כדור הארץ משכה את הצד הקרוב פנימה, והאפקט הצנטריפוגלי של הקורוטציה משך את הגוף החוצה. הגוף היה הפחוס ביותר כשהתקרב לבסיס של 3,000 ק"מ, סמוך לקו; צורתו הייתה אז תלת-צירית, בערך 1.8 : 1.4 : 1 — ארוכה לכיוון כדור הארץ, בינונית לאורך המסלול, קצרה בקטבים — והגוף המתוח היה נפוח, בכ-1,700 ק"ג/מ"ק (C.1). שלישית, בתוך שלב ה-3,000 ק"מ, ברגע שמרכז המסה שלו עבר את קו הקורוטציה, המשיכה נטו שלחצה אותו על הבסיס ירדה לאפס וחלק הביצה של הצורה השתחרר (C.6): הקורוטציה נתנה לו להתעגל ולהיפרד. הוא התעגל בירידת נפח, המתיחה השתחררה והגוף נעשה קטן וצפוף יותר. הסיבוב כמעט לא השתנה (יממת כדור הארץ התארכה רק מ-5.5 ל-5.77 שעות, ועמה קו הקורוטציה זו החוצה מ-15,818 ל-16,399 ק"מ), אבל גוף צפוף יותר מושך את עצמו יחד חזק יותר, ואותו סיבוב יכול להחזיק בליטה קטנה יותר; מאוחר בהתעגלות יחס הצירים הוא כ-1.20, וכשלושה רבעים מן הפחיסות כבר נעלמו. השאר נעלם לפני שהגוף עוזב: ההתעגלות פנימה מושלמת בעוד הגוף מחובר. אילו האגס לא התארך כדי לשאת את הגוף אל הקו, המסה הייתה חוזרת. רביעית, ברגע השחרור, כ-210 ק"מ מעבר לקו, הגוף עגול — יחס צירים של 1.04 לכל היותר — והקליפה החיצונית שלו קשיחה (מאמר 2, §B.7). מה שקורה אחרי השחרור הוא עניין נפרד וקטן בהרבה: הירח הנעול מסתובב פעם אחת בכל הקפה, וככל שהוא מתרחק סיבובו מאט — 14 שעות ב-30,000 ק"מ, 41 שעות ב-60,000 ק"מ — והבליטה הסיבובית והגאותית הקטנה שכל גוף קשיח מסתובב נושא מצטמקת עמו. האיור מראה את שני הקטרים לאורך הדרך.



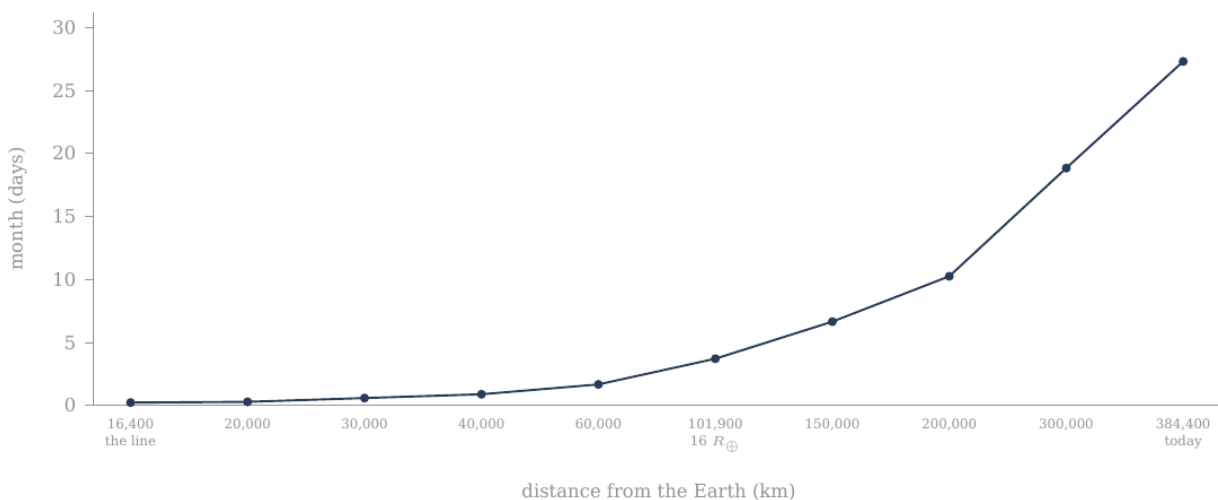
איור 13. הקוטר הארוך והקוטר הקצר (הקוטבי) של הירח משיא הפחיסות ועד היום, כנגד הזמן (הציר מעוות, השלבים המוקדמים מתווכים). הפחיסות גדלה לפני הנקודה הראשונה, כשהגוף יצא על קצה האגס ונע החוצה; היא אינה משורטטת. הפער בין שתי העקומות הוא הפחיסות: הרחב ביותר בשיאה, כשהגוף התקרב לבסיס של 3,000 ק"מ סמוך לקו הקורטוציה (1.8 : 1.4 : 1, בכ-1,700 ק"ג/מ"ק; הקוטר הארוך הוא קו כדור הארץ, והבינוני, לאורך המסלול, 4,628 ק"מ, אינו משורטט), הולך ונסגר בהתעגלות לאחר שמרכז המסה עבר את הקו — תחילה כשחלק הביצה משתחרר (1.40), אחר כך עם ההתעבות — עד כ-1.20, וסגור ברגע השחרור, כ-210 ק"מ מעבר לקו הקורטוציה (הקו ב-16,399 ק"מ במשוואה, 17,287 ק"מ ב-22.5°), כשהגוף עגול בתוך קליפתו הקשיחה ($a/c \leq 1.04$). אחרי השחרור נשארת רק הבליטה הגאותית הקטנה של הגוף הקשיח (1.03 ב-30,000 ק"מ, סיבוב של 14 שעות; 1.00 ב-60,000 ק"מ, סיבוב של 41 שעות). החצים מסמנים את גודלי המכתשים שהצטופפום הקוטבית הנקיה (D.2) מצביעה על כל שלב: הגדולים ליד השיא, הקטנים מאוחר בהתעגלות, לפני השחרור. הקטרים מחושבים מנפח מסת הירח בצפיפות של הרצף המשווית לכל שלב ומן הצורה של השלב (C.1; בשיא, 1.75 : 1.45 : 1); שתי העקומות יורדות משום שהנפח יורד כשהמתיחה משתחררת — הקוטר השקול יורד מכ-4,350 ק"מ בשיא ל-3,778 ק"מ בשחרור; היחס בין הקוטב למשוואה, שהמאמר בודק, אינו תלוי בגודל הכולל. (גרסה קודמת של האיור ציירה את הגוף עדיין פחוס, a/c 1.20, ברגע השחרור.) (בגרף: ציר אנכי — קוטר הירח בק"מ; ציר אופקי — השלבים: שיא הפחיסות סמוך לקו, שלבי ההתעגלות מעבר לקו, מאוחר בהתעגלות, השחרור כ-210 ק"מ מעבר לקו, ההתרחקות והיום; אדום — הקוטר הארוך (המשווני), כחול כהה — הקוטר הקוטבי; בשיא 5,585 ו-3,191 ק"מ, ב-1.40 ו-3,479 ק"מ.)

מדוע המכתשים הגדולים צפופים ביותר. מכתש שומר את הצפיפות של ההתעגלות שהתרחשה אחרי שנוצר. הסיבה גאומטרית: ההתעגלות פנימה מכווצת את פני השטח הקוטביים ואוספת את כל מה שמונח עליהם, כך שמכתש שכבר היה קיים כשההתעגלות התחילה נישא דרך כולה, ואילו מכתש שהגיע באמצעה נישא רק דרך המחצית השנייה. מכתש שנוצר בשיא, על הצורה 1.8 : 1.4 : 1, עובר את ההתעגלות כולה ומסיים צפוף בקטבים פי 1.5 בערך; מכתש שנוצר מאוחר בהתעגלות, על גוף ביחס 1.20, עובר רק את החלק האחרון ומסיים בכ-1.17; ומכתש שנוצר אחרי שהירח היה עגול — אחרי השחרור, בזמן ההתרחקות — אינו נעשה צפוף כלל. הרגע הפחוס ביותר היה גם רגע הלחץ הפנימי הגדול ביותר, כשחומר הושלך ונפל בחזרה בעוצמה הרבה ביותר, ורוב המכתשים הגדולים נוצרו אז (מאמר 6). חומר הושלך במהלך הפחיסות ולפניה, ולכן מכתשים נרשמו גם בזמן שהגוף עדיין נפחוס; הם נישאו בהתעגלות שבאה אחר כך, והציפוף שהם נושאים מתעד עד כמה הגוף היה פחוס כשנוצרו. זו הסיבה שהציפוף הקוטבי מתעד את הפחיסות. מכתש גדול וצפוף יותר נוצר קרוב יותר לשיא — לא בהכרח מוקדם יותר, כי צורה בפחיסות נתונה נעברה גם בדרך מעלה וגם בדרך מטה. גודל המכתש הוא אפוא

שעון של הצורה: הגדול יותר — נוצר קרוב יותר לשיא, וצפוף יותר. זה הסדר שהספירה הנקייה מראה, כשהיחס עולה מ-1.09 בקבוצת הגודל הקטנה ביותר ל-1.53 במכתשים של 60–100 ק"מ (D.2).

הקטבים לאורך שלושת השלבים. הקטבים ותיקים מן הפחיסות. הם נוצרו בהתעגלות החוצה, כשהגוף שישב על קצה האגס הפך לכדור וציר הסיבוב שלו נקבע (מאמר 3, §B.4); המכתשים שכבר היו על הקליפה השתנו אז עם פני השטח, באופן שווה בכל מקום, ומכתשים חדשים המשיכו להגיע. בפחיסות הקטבים התחזקו: ההתמיינות התקדמה, החומר שהושלך היה קל ומלא מים, המכתשים הגדולים ביותר נוצרו, וחומר חדש נפל על הקטבים כמו על שאר הגוף. בהתעגלות פנימה, לאחר שמרכז המסה עבר את קו הקורטוציה, כשהפחיסות נרגעה, פני השטח נסגרו יותר מכל בקטבים ופחות מכל במשווה, והמכתשים שעליהם — ששמרו על גודלם (§D.5) — נאספו בקטבים; מכתשים שנרשמו בזמן הפחיסות התכווצו עם ההתעגלות. הסדר הוא זה ששעון הגודל קורא: הגדולים ביותר, שנוצרו הכי קרוב לשיא הפחיסות, צפופים ביותר; הקטנים, שנוצרו מאוחר, צפופים פחות מכולם. שלושת השלבים הם אפוא התעגלות החוצה (הקטבים נקבעים), פחיסות (המכתשים הגדולים נוצרים) והתעגלות פנימה (המכתשים נאספים לעבר הקטבים).

היכן נולד החודש. ברגע השחרור הקפת הירח נמשכת מעט יותר מ-5.77 שעות: החודש נולד כמעט שווה ליממה, מעט ארוך ממנה, כי הירח מתחיל להיפרד בקו הקורטוציה, שבו ההקפה שלו וסיבוב כדור הארץ נמשכים אותו זמן (6.25 שעות ב-17,287 ק"מ, ב-22.5°), ומשתחרר כ-210 ק"מ מעבר לו, במסלול מעט אליפטי (אקסצנטריות של כ-0.037, מאמר 4). משם הוא מתארך עם המרחק, לפי חוק Kepler בלבד — זמן ההקפה של מסלול גדל כמו המרחק בחזקת שלוש חציים: 14 שעות ב-30,000 ק"מ, 3.7 ימים ב-16 רדיוסי כדור הארץ, והיום 27.3 ימים (איור 14). שום הנחה נוספת אינה נכנסת לעקומה הזו; משנקבעה נקודת השחרור, החודש בכל מרחק מאוחר יותר נובע מחוק הכבידה.



איור 14. היכן נולד החודש: זמן ההקפה של הירח — החודש — כנגד מרחקו מכדור הארץ, מ-5.77 שעות ברגע השחרור (שווה ליממת כדור הארץ של אותו זמן) ועד 27.3 ימים היום, לפי חוק Kepler $T = 2\pi\sqrt{r^3/\mu}$, $\mu = G(M_{\oplus} + m)$, כאשר r הוא המרחק בין המרכזים, $M_{\oplus}$ מסת כדור הארץ ו- m מסת הירח). העקומה מתחילה כמעט שטוחה — חודש של שעות — ועולה בתלילות רק הרחק בחוץ. העקומה מתחילה בקו הקורטוציה, 16,400 ק"מ, והשחרור נמצא כ-210 ק"מ מעבר לו. (בגרף: ציר אנכי — החודש בימים; ציר אופקי — המרחק מכדור הארץ בק"מ, מ-16,400 (הקו) 101,900 דרך $(16 R_{\oplus})$ ועד 384,400 (היום)).

התעגלות אחת. במאמר 1 (שלב 5) הגוף המחובר מתעגל על האגס; סעיף זה פורש את שלביה. היא מתחילה אחרי הפחיסות, בתוך שלב ה-3,000 ק"מ, ברגע שמרכז המסה של הגוף עבר את קו הקורטוציה; היא נמשכת ככל שהגוף מתהדק; היא מושלמת בכשלושה רבעים מאוחר בהתעגלות, ביחס צירים של כ-1.20; והיא מושלמת עד השחרור, כ-210 ק"מ מעבר לקו, כשהגוף עוזב עגול, בתוך קליפה קשיחה. השלב המחובר היה ארוך, וכך גם

כל אחד מחלקיו. במודל הבליטה התחילה כ-600 מיליון שנה לפני השחרור, שהתרחש לפני 3.873 מיליארד שנה — כלומר בסביבות 4.5 מיליארד שנה לפני היום: כ-400 מיליון שנה לבליטה ולאגס, כ-100 מיליון שנה של פחיסות, וכ-100 מיליון שנה מסוף הפחיסות ועד השחרור, זמן ההתעגלות פנימה. ההתעגלות לא הייתה אפוא לחוצה בזמן: הקצב שלה נקבע על ידי שחרור הלחיצה על הבסיס על הקו ועל ידי ההתהדקות, לא על ידי הרפיית החומר (C.7).

מתי הושלם הכדור. מאוחר בהתעגלות יחס הצירים היה כ-1.20; עד השחרור ההתעגלות פנימה הושלמה, והגוף היה עגול וקליפתו קשיחה (יחס צירים של 1.04 לכל היותר; מאמר 2, B.7§). אחרי השחרור נשאר אפקט קטן אחד, ואין לבלבל אותו עם הפחיסות של השלב המחובר. גוף קשיח שמסתובב ומקיף קרוב לכוכב לכת נושא בליטה סיבובית וגאותית קטנה, שנקבעת על ידי הסיבוב והמרחק שלו. סיבובו של הירח הנעול עקב אחר ההקפה שלו — 14 שעות ב-30,000 ק"מ, 41 שעות ב-60,000 ק"מ — והבליטה הקטנה הזו של הגוף הקשיח עקבה אחר הסיבוב: 1.03, ואחר כך 1.00. בסביבות 60,000 ק"מ, פחות מעשרה רדיוסי כדור הארץ והרבה בתוך 16 רדיוסי כדור הארץ שבהם הצורה קפואה לפי מאמר 4, גם הבליטה הזו נעלמה, והירח היה עגול בכל מדד. הבליטה המאובנת הקטנה שהוא נושא היום ($f \approx 0.001$, לעומת כ-0.44 בשיא) אומרת את אותו הדבר: הפחיסות של השלב המחובר נעלמה, ונשאר רק עקב קטן ממנה פי ארבע מאות.

מה שיש בידינו עכשיו: ציר זמן שבו העומס על הבסיס הגדול ביותר כשהגוף מחזיק את עצמו (12,994 ק"מ, $k = 0.67$); הגוף נפחס כשהוא נע החוצה על בסיס מצטמצם והוא הפחוס ביותר כשהוא מתקרב לבסיס של 3,000 ק"מ סמוך לקו (כ-1.8 : 1.4 : 1, בכ-1,700 ק"מ/מ"ק); הוא מתעגל לאחר שמרכז המסה שלו עובר את הקו, בירידת נפח, ומגיע לכ-1.20 מאוחר בהתעגלות; והוא עוזב עגול, מוחזק על ידי קליפה קשיחה, כ-210 ק"מ מעבר לקו.

C.6 הבסיס הרחב: מה נשא, והיכן הרפה

C.5 הראה שהגאות על הגוף המחובר הייתה תמיד גדולה ממה שגוף נזלי חופשי יכול לשאת. סעיף זה שואל מה נשא את ההפרש, כיצד העומס הזה השתנה לאורך הדרך — תחילה לגוף כולו, ואחר כך נקודה אחר נקודה על פני שטחו — ומדוע התמיכה הרפתה ברגע שהרפתה.

(א) לגוף כולו. הירח נפרד מבסיס רחב, והגאות היא הסיבה שהבסיס היה צריך להיות רחב. בכל שלב מחובר הגאות של כדור הארץ על הגוף עלתה על מה שכבידתו שלו יכלה להחזיק: כשהגוף החזיק את עצמו, ב-12,994 ק"מ, פי שבעה ($k = 0.67$) לעומת 0.09 שגוף נזלי חופשי יכול לשאת). גוף חופשי היה נקרע שם; הגוף הזה לא נקרע, כי ישב על בסיס ברוב 6,000 ק"מ שנשא את העומס הגאותי במקומו. טיפה התלויה מקצה של מזרק היא תמונה הולמת לעומס: הטיפה נשארת שלמה כל עוד הקצה מחזיק אותה. האופן שבו נפרד הגוף מן הבסיס מתואר בסוף הסעיף. מאמר 3 דרש חיבור רחב מסיבה אחרת — האיזון הרדיאלי של לחץ, התנגדות ועומס (A.3§) — וכאן הוא נדרש גם כנגד הגאות.

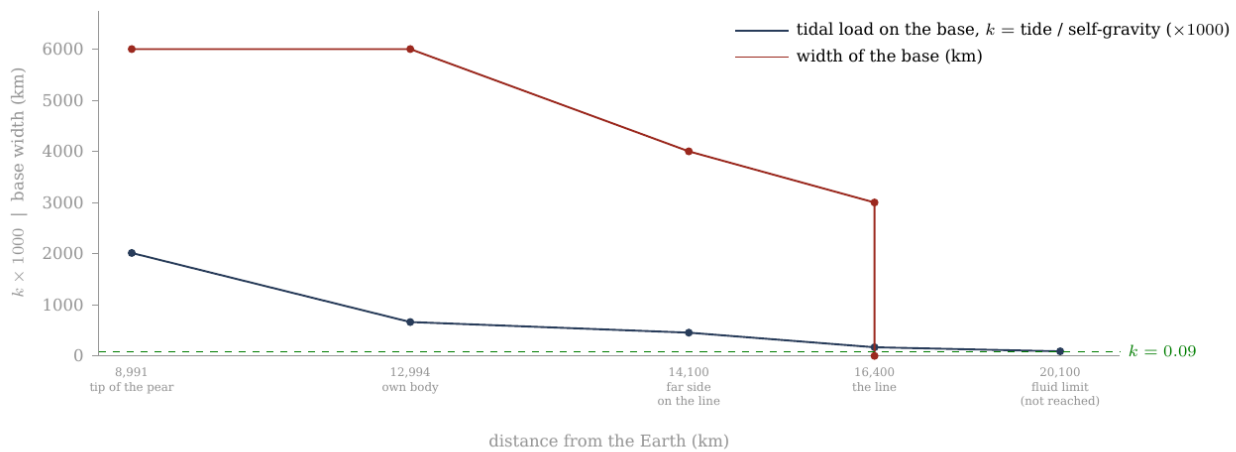
הבסיס הצטמצם מ-6,000 ל-3,000 ק"מ כשהגוף נפחס ונע החוצה, וקיבל צורה וגוף משלו; העומס עליו ירד עם המרחק ($1/r^3$): התרחקות מתונה מקטינה אותו בחדות). השלבים — המסה בקצה האגס, הפחיסות על הבסיס המצטמצם, חציית קו הקורוטציה, ההתעגלות, השחרור וההתרחקות — מפורטים בטבלת שלבי הניתוק שבראש המאמר.

העומס והרוחב לאורך הדרך נתונים בטבלה הבאה. קראו אותה כזוג עמודות יורדות: ככל שהמרחק גדל העומס k יורד, והבסיס מצטמצם כשהגוף נפחס ונע החוצה, עד שברגע השחרור הבסיס מרפה.

מרחק (ק"מ)	שלב	צפיפות	$k = \text{גאות} / \text{כבידה}$ עצמית	רוחב הבסיס (ק"מ)
------------	-----	--------	---	------------------

6,000	2.01	1,300	מסה שהתאספה בקצה האגס	8,991
6,000	0.67	1,300	גוף משלו, נפח עומס הגדול ביותר מאז 1,300 מחזיק את עצמו —	12,994
			(גבול רוש הקשיח ב-1,300)	
4,000-כ-0.45 (באינטרפולציה)		1,500-כ	הצד הרחוק חוצה את קו הקורוטציה; פחיסות, הבסיס מצטמצם	14,100-כ
3,000	>0.25	1,700-כ	בהתקרבות לקו על הבסיס של 3,000 ק"מ; שיא הפחיסות	<16,400
3,000 → 0	0.17	2,600	מרכז המסה על קו הקורוטציה — הגוף מתעגל ומתחיל להיפרד; שחרור כ-210 ק"מ מעבר לו; הגוף עגול) $(a/c \leq 1.04)$	16,400
—	0.09	2,600	(הגבול הנוזלי ב- $k = 0.09$, 2,600 — לא מושג; גרסה קודמת נתנה 20,600 ו-0.084)	(כ-20,100)

העומס הגאותי k ורוחב הבסיס לאורך השלבים המחוברים. הצפיפויות בק"ג/מ"ק.



איור 15. הבסיס הרחב: העומס הגאותי שנשא (k , בכחול כהה, מוכפל פי 1000) ורוחבו (באדום) כנגד המרחק מכדור הארץ. העומס הגדול ביותר כשהגוף מחזיק צורה משלו (12,994 ק"מ) ויורד עם המרחק; הבסיס מצטמצם מ-6,000 ל-3,000 ק"מ כשהגוף נפחם ונע החוצה, ומרפה ברגע השחרור: ההיפרדות מתחילה כשמרכז הירח מגיע לקו הקורוטציה (16,400 ק"מ), והגוף משתחרר כ-210 ק"מ מעבר לו. הסף הנוזלי $k = 0.09$ (מקווקו) מושג רק ליד 20,100 ק"מ (גרסה קודמת נתנה 20,600), מעבר לשחרור: הגוף המשוחרר הוחזק על ידי הקליפה הקשיחה שלו. נקודות הקצה ממאמר 3 (בסיס של 6,000 ק"מ על קצה האגס, 3,000 ק"מ במגע האחרון) וממאמר 2 (צפיפות 2,600 ברגע השחרור); הנקודות שביניהן באינטרפולציה. (בגרף: ציר אופקי — המרחק מכדור הארץ בק"מ: 8,991 קצה האגס, 12,994 גוף משלו, 14,100 הצד הרחוק על הקו, 16,400 הקו, 20,100 הגבול הנוזלי (לא מושג); ציר אנכי — $k \times 1000$ | רוחב הבסיס בק"מ.)

את אותו סיפור אפשר לספר בתאוצות, וכך רואים את שני צדי האיזון בנפרד. הכבידה העצמית של הגוף על פני שטחו עלתה כשהתהדק במסה קבועה — אותה מסה בכדור קטן יותר מושכת חזק יותר על פני שטחו: 0.87 מ"ש² כקצף, 0.95 בכ-1,500 ק"ג/מ"ק, 1.37 ברגע השחרור, 1.62 היום. הגאות עליו ירדה ברציפות עם המרחק, מפי שלושה מן הכבידה העצמית בקצה האגס ועד רבע ממנה ברגע השחרור. עד השחרור הבסיס, ואחריו הקליפה הקשיחה, נשאו את ההפרש; גוף נוזלי היה זקוק ליחס מתחת ל-0.135, שמושג רק ליד 20,100 ק"מ (גרסה קודמת נתנה 20,600).

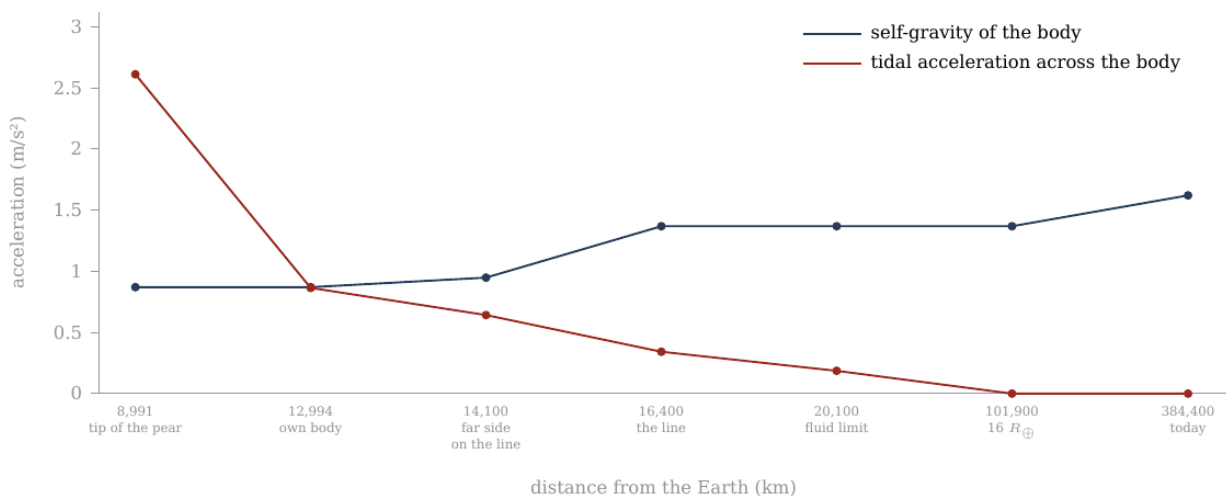
שלב	r (ק"מ)	צפיפות	R (ק"מ)	כבידה עצמית (מ"ש ²)	גאות לרוחב הגוף	גאות / כבידה עצמית
קצה האגס	8,991	1,300	2,381	0.87	2.61	3.0
גוף משלו (גבול רוח הקשיח)	12,994	1,300	2,381	0.87	0.87	1.0
הצד הרחוק על הקו	14,100	1,500	2,269	0.95	0.64	0.67
שחרור	16,400	2,600	1,889	1.37	0.34	0.25
$R_{\oplus} 16$	101,900	2,600	1,889	1.37	0.001	0.001
היום	384,400	3,344	1,738	1.62	0.00002	0

הכבידה העצמית של הגוף והתאוצה הגאותית לרוחבו, מקצה האגס ועד היום. הצפיפויות בק"ג/מ"ק, התאוצות במ"ש².

העמודות הן, לפי הסדר: היכן היה הגוף, כמה היה צפוף, הרדיוס שלו R (שמצטמק ככל שהוא מתהדק), הכבידה על פני שטחו שלו, התאוצה הגאותית לרוחבו (ההפרש בין משיכת כדור הארץ על פני השטח הקרובים שלו לבין

משיכתו על מרכזו), והיחס בין השתיים. שתי העמודות הימניות נחתכות בגבול רוש הקשיח, שם הגוף מחזיק לראשונה צורה משלו והגאות לרוחבו שווה לכבידתו העצמית (יחס 1.0); לפני כן הגאות גוברת, אחרי כן כבידת הגוף גוברת, ועד 16 רדיוסי כדור הארץ הגאות זניחה.

שני מדדים לאותה גאות. ה- k של C.5 והעמודה האחרונה בטבלה זו אינם אותו מספר, וההבדל הוא עניין של הגדרה, לא של פיזיקה. $k = M_{\oplus} / (\pi \rho r^3)$ הוא המדד שהוגדר ב-C.5, וביחס אליו מנוסח הסף הנוזלי של 0.09. העמודה האחרונה כאן היא היחס הישיר בין שתי תאוצות: המתיחה הגאותית לרוחב הגוף, $2GM_{\oplus}R/r^3$, חלקי הכבידה העצמית על פני שטחו, $\frac{4}{3}\pi G\rho R$. כשמחלקים אחת בשנייה, הרדיוס מצטמצם והיחס הוא $\frac{3}{2}M_{\oplus}/(\pi\rho r^3)$ — פי אחד וחצי מ- k . לכן שתי העמודות נעות יחד בכל שלב: $k = 0.67$ בגבול רוש הקשיח מתאים ליחס 1.0; $k = 2.01$ בקצה האגס ל-3.0; $k = 0.17$ ברגע השחרור ל-0.25; והסף הנוזלי $k = 0.09$ הוא אותו סף כמו היחס של כ-0.135 שמשמש כאן ובאיור 16. היכן שהטבלה הראשונה ואיור 15 מכנים את k "גאות / כבידה עצמית", הכוונה למדד של C.5.



איור 16. הכבידה העצמית מול הגאות, מן המסה בקצה האגס ועד היום. כבידת הגוף עצמו (בכחול כהה) עולה ככל שהוא מתהדק במסה קבועה — 0.87 מ'ש² כקצף, 1.37 ב-2,600 ק"ג/מ"ק ברגע השחרור, 1.62 היום ב-3,344; התאוצה הגאותית לרוחבו (באדום) יורדת עם המרחק, מפי שלושה מן הכבידה העצמית בקצה האגס ועד רבע ממנה ברגע השחרור (כ-210 ק"מ מעבר לקו שב-16,400 ק"מ), ומתחת לסף הנוזלי (0.135, הסף $k = 0.09$ של C.5 מבוטא כיחס הזה) רק ליד 20,100 ק"מ, מעבר לשחרור (גרסה קודמת נתנה 20,600). שתי העקומות נחתכות בגבול רוש הקשיח, שם הגוף מחזיק לראשונה צורה משלו: 1,300 ק"ג/מ"ק, 12,994 ק"מ (10,314 ק"מ ב-2,600, מאמר 2). הצפיפויות שבין 1,300 ל-2,600 הן שלבים ברצף. (בגרף: ציר אנכי — תאוצה במ'ש²; ציר אופקי — המרחק מכדור הארץ בק"מ, מ-8,991 (קצה האגס) דרך 12,994 (גוף משלו), 16,400 (הקו) ו-20,100 (הגבול הנוזלי) ועד 384,400 (היום)).

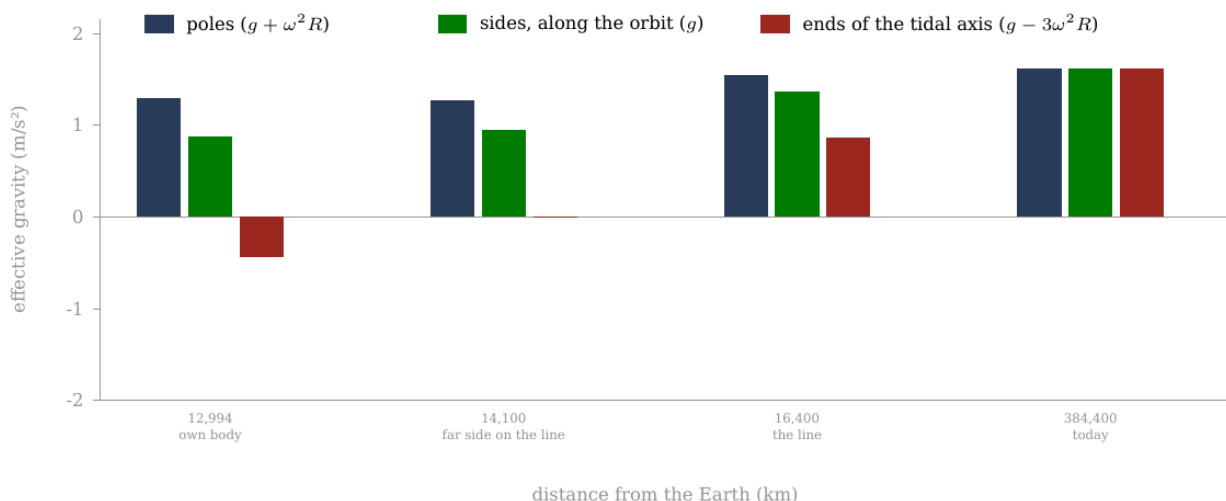
(ב) לפי המקום על הגוף. על גוף שמסתובב עם כדור הארץ, הכבידה האפקטיבית — מה שגרגר חופשי על פני השטח חש בפועל, משיכת הגוף שלו יחד עם הגאות והסיבוב — אינה מספר אחד. היא תלויה במקום שבו הגרגר עומד. בקטבים היא הכבידה העצמית ועוד הדחיסה הגאותית $(g + \omega^2 R)$: בניצב לקו אל כדור הארץ הגאות לוחצת את הגוף פנימה ומצטרפת למשיכתו שלו. בצדדים, לאורך ציר התנועה, היא הכבידה העצמית בלבד, כי האיבר הצנטריפוגלי מקזז שם את הגאות. ובשני הקצוות של ציר הגאות — הנקודה הפונה אל כדור הארץ והנקודה הפונה ממנו — היא הכבידה העצמית פחות המתיחה $(g - 3\omega^2 R)$, כי שם הגאות וההשלכה החוצה של הסיבוב פועלות יחד כנגד משיכת הגוף. כאן ω היא המהירות הזוויתית של הסיבוב ו- R רדיוס הגוף. כשהגוף מחזיק את עצמו לראשונה, ב-12,994 ק"מ, הקצוות שליליים — חומר שם היה נמשך החוצה אלמלא הבסיס — והקטבים נושאים פי אחד וחצי מן הצדדים. זו הסיבה שהבסיס נדרש דווקא לאורך ציר הגאות, ושהקטבים נלחצו.

עד השחרור הפיזור הצטמצם: 1.54 מ"ש² בקטבים, 1.37 בצדדים, 0.86 בקצוות — כל נקודה מוחזקת בכבידתו שלו, והקצוות בהרבה פחות מערכה המלא. היום, ב-384,400 ק"מ, ההבדלים נעלמו: 1.62 בכל מקום.

שלב	r (ק"מ)	קטבים	צדדים (ציר התנועה)	קצוות ציר הגאות
גוף משלו (גבול רוש הקשיח)	12,994	1.30	0.87	-0.43
הצד הרחוק על הקו	14,100	1.27	0.95	-0.01
שחרור	16,400	1.54	1.37	0.86
היום	384,400	1.62	1.62	1.62

הכבידה האפקטיבית (מ"ש²) לפי המקום על הגוף — קטבים, צדדים וקצוות ציר הגאות — מן הרגע שהגוף מחזיק לראשונה צורה משלו ועד היום.

קראו את הטבלה לרוחב כל שורה: שלושת המספרים מפוזרים מאוד כשהגוף מחזיק לראשונה את עצמו, מתקרבים זה לזה עד השחרור, ושווים היום. הערך השלילי בשורה הראשונה הוא עיקר הטבלה: אלמלא הבסיס, הקצה הקרוב והקצה הרחוק של הגוף הצעיר היו מתרוממים ממנו.



איור 17. הכבידה האפקטיבית לפי המקום על הגוף שמסתובב עם כדור הארץ — קטבים, צדדים ושני הקצוות של ציר הגאות — מן הרגע שהגוף מחזיק לראשונה צורה משלו ועד היום. ב-12,994 ק"מ הקצוות שליליים (העמודה האדומה תלויה מתחת לקו האפס): חומר שם היה נמשך החוצה אלמלא הבסיס; הקטבים נושאים פי אחד וחצי. במקום שבו הצד הרחוק חוצה את הקו (כ-14,100 ק"מ, בצפיפות שלב של כ-1,500 ק"ג/מ"ק) הקצוות עומדים סמוך לאפס. עד השחרור הפיזור הצטמצם, והיום, ב-384,400 ק"מ, הוא נעלם: 1.62 מ"ש² בכל מקום. (בגרף: כחול כהה — קטבים $(g + \omega^2 R)$; ירוק — צדדים, לאורך המסלול (g) ; אדום — קצוות ציר הגאות $(g - 3\omega^2 R)$; ציר אנכי — כבידה אפקטיבית במ"ש²; ציר אופקי — המרחק מכדור הארץ בק"מ: 12,994 גוף משלו, 14,100 הצד הרחוק על הקו, 16,400 הקו, 384,400 היום.)

כיצד נפרד הגוף מן הבסיס. הבסיס עבד קשה ביותר כשהיה רחב ביותר. כשמרכז המסה של הירח הגיע לקו הקורוטציה, הגוף התחיל להתעגל ולהיפרד — השחרור של מאמרים 2 ו-4 — ובזמן הזה הקליפה כבר הייתה קשיחה והבסיס כבר לא נדרש. שלושה דברים נפגשו ברגע הזה. בתוך קו הקורוטציה גוף שמסתובב עם כדור הארץ נע לאט מדי למסלול חופשי: הכבידה של כדור הארץ מושכת אותו פנימה יותר משהסיבוב משליך אותו החוצה, הגוף לחוץ על הבסיס שלו, והבסיס לוחץ בחזרה מלמטה — האיזון הרדיאלי של מאמר 3. בקו השניים שווים, והלחיצה הזו יורדת לאפס; מעבר לו היא הופכת למשיכה הרחק מן הבסיס. העומס הגאותי ירד בינתיים ל- $k = 0.17$, עומס שהקליפה הקשיחה נושאת לבדה. והמגע כבר הצטמצם ל-3,000 ק"מ. כשלא נשאר לבסיס דבר

לשאת, המגע התנגד רק מעט: הגוף נמשך החוצה בכוח ושחרר כ-210 ק"מ מעבר לקו, כשקצת יותר ממחציתו (כ-58%) כבר עבר (מאמר 4). בניתוק הלחץ של כדור הארץ, שעבר דרך האגס אל הירח, חדל להגיע אליו, ואיתו הפליטות.

הלחץ מלמטה, במספרים. הטבלה עוקבת אחר המשיכה נטו על הגוף — הכבידה של כדור הארץ פחות המשיכה הצנטריפוגלית של הסיבוב, במרכז הגוף — לאורך אלף הקילומטרים האחרונים לפני הקו ועד השחרור. כשמכפילים אותה במסת הגוף ומחלקים בשטח הבסיס של 3,000 ק"מ, מתקבל העומס שבו הגוף לחץ על הבסיס שלו; העומס הזה אינו תלוי בצפיפות הגוף. לצדו עומדת המתיחה: ההפרש בין המשיכה על הצד הקרוב לזו שעל הצד הרחוק, $(2\mu + \Omega^2)R$ על פני השטח, עם $\mu = GM_{\oplus}/r^3$, והעומס שהיא מפעילה לרוחב מישור האמצע של הגוף. התאים הכחולים מעמיקים עם הלחיצה על הבסיס; התאים האדומים מסמנים את המשיכה הרחק ממנו.

מרכז הגוף ביחס לקו (ק"מ)	משיכה נטו במרכז (מ'ש ² , + פנימה)	עומס על הבסיס (ג'יגה-פסקל)	מתיחה על פני השטח (מ'ש ²)	מתיחה לרוחב מישור האמצע (ג'יגה-פסקל)	משיכה נטו, קצה קרוב / רחוק (מ'ש ²)
-1 000	0.293	לחיצה 3.04	0.585	1.14	0.97 / -0.23
-750	0.216	2.24	0.566	1.10	0.87 / -0.29
-500	0.142	1.47	0.548	1.07	0.77 / -0.35
-250	0.070	0.72	0.530	1.03	0.68 / -0.41
-100	0.028	0.29	0.521	1.01	0.62 / -0.44
הקו, 0	0	0	0.514	1.00	0.59 / -0.47
+100	-0.027	-0.28	0.508	0.99	0.55 / -0.49
+210, שחרור	-0.057	משיכה החוצה -0.59	0.502	0.98	0.52 / -0.51

הלחיצה על הבסיס מול המתיחה, מאלף ק"מ לפני קו הקורטציה ועד השחרור כ-210 ק"מ אחריו.

הקו נלקח ב-16,398 ק"מ (5.77 שעות, עם תיקון שני הגופים); הבסיס ברוחב 3,000 ק"מ, שטח של 7.07×10^{12} מ"ר; המתיחה מחושבת לגוף ברגע השחרור, 2,600 ק"ג/מ"ק ורדיוס 1,889 ק"מ. קראו את שני חצאי הטבלה זה מול זה. הלחיצה על הבסיס יורדת מכ-3.0 ג'יגה-פסקל אלף קילומטר לפני הקו לאפס על הקו, והופכת למשיכה החוצה של 0.6 ג'יגה-פסקל ברגע השחרור: שינוי של 3.6 ג'יגה-פסקל. לאורך אותו קטע העומס של המתיחה משתנה ב-0.16 ג'יגה-פסקל, פי עשרים ושניים פחות; המתיחה חלשה ב-14% לאורך כל הקטע ורק ב-2.5% מן הקו ועד השחרור. לקנה מידה: הכבידה של הגוף עצמו קושרת את שני חצאיו בכ-2.7 ג'יגה-פסקל על פני שטח הבסיס; חוזק הקליפה כ-0.1 ג'יגה-פסקל; והחזקת צורת השיא מחוץ לעיגול דורשת מאמץ בסדר גודל של $\rho g(a - c)$, כ-2 ג'יגה-פסקל ל-1.75 : 1.45 : 1 ב-1,700 ק"ג/מ"ק (1.5 ג'יגה-פסקל ב-1,300, 3.7 ב-2,600).

במונחי המודל: בתוך הקו כדור הארץ מושך את הגוף כולו למטה חזק יותר משהסיבוב משליך אותו החוצה, ולכן הגוף לחוץ על הבסיס שלו והבסיס לוחץ בחזרה מלמטה, והלחיצה הזו בגודל של מה שהחזקת הצורה הפחוסה דורשת. כשהגוף עובר את קו הקורטציה פחות מחזיק אותו אל כדור הארץ: הלחיצה יורדת לאפס והופכת למשיכה החוצה, הלחץ מלמטה יורד, והירח משתחרר. המתיחה — הצד הקרוב נמשך פנימה, הצד הרחוק החוצה — כמעט אינה משתנה. בגודל, אפוא, אובדן הלחיצה מלמטה הוא שחרור מספיק לחלק הביצה של הצורה, והיחלשות המתיחה אינה. הלחיצה סימטרית סביב קו כדור הארץ, ולכן היא מחזיקה את חלק הביצה ולא את חלק הפיתה, שאותו משחררת ההתעבות (C.4). כיצד בדיוק הלחיצה החזיקה את הצורה לא חושב כאן; זו דרישה של המודל (E.3). המתיחה שנשארת מעבר לקו עדיין פועלת לכיוון ביצה, ועד כ-20,100 ק"מ היא עולה

על מה שגוף נוזלי של 2,600 ק"ג/מ"ק יכול לשאת: הקליפה מתנגדת לה — אותה קליפה קשיחה ששומרת על הצורה ב-1.04 לכל היותר ברגע השחרור (C.1).

הפקק. אנו מציעים שהניתוק של הירח חשף את הפתחים של האגס. כל עוד הירח יושב על קצה האגס הוא סגר את פתחי האגס, כמו פקק שסוגר בקבוק; כשהוא התנתק הפקק יצא, והלחץ באגס השתחרר. משנעלם הלחץ, שום דבר כבר לא האריך את האגס. כך מוסבר מדוע האגס חזר אחרי הניתוק במקום להמשיך להימתח, מדוע לא שחרר ירח שני, ומדוע חומר התפזר לכל הכיוונים על הירח, כשכדור הארץ שחרר את הלחץ שלו בלי הפקק.

C.7 מה הקרום היה חייב להיות

C.5 ו-C.6 תיארו מה הגוף עבר; סעיף זה שואל ממה היה חייב להיות עשוי כדי לעבור זאת ועדיין לשאת את התיעוד שאנו סופרים היום. שתי דרישות מושכות לכיוונים מנוגדים. הגוף היה צריך להיות רך מספיק כדי להתעגל — לוותר על פחיסות של כ-1.8 : 1.4 : 1 בעודו מחובר. לפני השטח שלו היו צריכים להיות קשיחים מספיק כדי לשמור על מכתשיהם שלמים, עם השוליים והקטרים שלהם, לאורך אותו שינוי עצמו. התשובה היא ששתי הדרישות שייכות לשתי שכבות שונות.

ההתעגלות באה מאוחר, אחרי הפחיסות, סמוך לקו הקורוטציה, והשלב המחובר היה ארוך: במודל עברו כ-600 מיליון שנה מתחילת הבליטה ועד השחרור לפני 3.873 מיליארד שנה — הירח היה מחובר מלפני כ-4.5 מיליארד שנה — ומתוכם הפחיסות נמשכה כ-100 מיליון שנה וההתעגלות פנימה, מסוף הפחיסות ועד השחרור, עוד כ-100 מיליון. השאלה אינה אפוא אם לגוף היה זמן להתעגל, אלא כיצד שתי שכבותיו קיבלו את השינוי.

המהירות שבה גוף יכול לשנות את צורתו נקבעת על ידי הצמיגות שלו η — ההתנגדות שלו לזרימה, הנמדדת בפסקל-שניות (Pa s). המעטפת של כדור הארץ, שזורמת רק על פני אלפי שנים, היא בערך 10^{21} . זמן ההרפיה של גוף המוחזק בכבידתו שלו הוא הזמן שלוקח לו להתייבב בצורה שהכבידה והסיבוב שלו דורשים, לאחר שהצורה הזו השתנתה. בסדר גודל הוא

$$\tau \approx \frac{\eta}{\rho g R}$$

לצמיגות η , צפיפות ρ , רדיוס R וכבידת פני שטח g . במילים: ככל שהחומר קשיח יותר, הוא מתייבב לאט יותר; ככל שהכבידה המניעה אותו חזקה יותר והגוף גדול יותר, הוא מתייבב מהר יותר. לגוף ברגע השחרור ($\rho = 2,600$ ק"ג/מ"ק, $R = 1,889$ ק"מ, $g = 1.37$ מ"ש²):

לעומת שלב מחובר של יותר מ- 10^8 שנה	זמן הרפיה	צמיגות η (Pa s)
שנה 4,700 עוקב אחר ההתהדקות מיד	10^{21} (המעטפת של כדור הארץ היום)	
שנה 47,000 עוקב מיד	10^{22}	
שנה 470,000 עוקב, בפיגור קצר	10^{23} (הקליפה של מאמר 3)	
מיליון שנה 4.7 עוקב, בפיגור של כמה מיליוני שנים	10^{24}	
מיליון שנה 47 בקושי עומד בקצב	10^{25}	

זמן ההרפיה של הגוף ברגע השחרור לפי הצמיגות, לעומת משך השלב המחובר.

כל הכפלה פי עשרה של הצמיגות מאטה את ההרפיה פי עשרה. השוו את העמודה האמצעית עם אורך השלב: השלב המחובר נמשך כ-600 מיליון שנה, וההתעגלות פנימה לבדה כ-100 מיליון. כל צמיגות עד 10^{24} Pa s מתייבבת בשבריר קטן של הזמן הזה ועוקבת אחר ההתהדקות מקרוב; ב- 10^{25} ההתייבבות נמשכת כמחצית מזמן ההתעגלות פנימה, והצורה רק בקושי עומדת בקצב.

שתי שכבות. מאמר 3 דורש שלקליפה החיצונית תהיה צמיגות של 10^{23} Pa s או יותר, כדי שהמכתשים שנחקקו בה על כדור הארץ ישרדו; והוא מתאר את הגוף שמתחתיה כחם ונייד. שני המספרים שייכים לשתי שכבות, וההתעגלות היא עבודתה של השנייה. גוף של 10^{21} – 10^{22} Pa s עוקב אחר צורת שיווי המשקל שלו בתוך 10^3 – 10^4 שנים מכל שינוי. הקליפה נישאת עליו: קשיחה מכדי לזרום, היא חייבת להתאים את עצמה לפני שטח שנסגרים מתחתיה, יותר מכל בקטבים ופחות מכל במשוואה. בקטבים היא מתקצרת יותר מכל — מתקפלת, נדחפת על עצמה, מתעבה — והמכתשים שעליה, היושבים על לוחות קשיחים, שומרים על צורתם בעוד הרווחים ביניהם נסגרים; לעבר המשוואה היא מתקצרת פחות, והמכתשים שם מתקרבים רק מעט. הקליפה אינה זורמת בקצב הזה: היא נישאת, ואת העיוות שאינה יכולה לקבל כזרימה היא מקבלת כהתקצרות, החזקה ביותר בקטבים והחלשה ביותר במשוואה — ובמקום שבו היא מתנגדת, כלחץ על הפנים שנפלט דרך הפתחים (C.4). התמונה היא של קרום של לוחות קרח על בריכה שמפלט המים בה יורד באופן לא אחיד: המים מתייצבים מיד, והלוחות, קשיחים מכדי להתכווץ, נדחסים זה אל זה יותר מכל במקום שבו פני השטח מתכווצים יותר מכל.

זו הסיבה שהתיעוד קריא. קליפה רכה כמו הגוף הייתה משתנה בצורתה ברציפות, ומכתש שעובר עיוות של שליש תוך כדי זרימה מאבד את שוליו; קליפה קשיחה מן הגוף משתנה על ידי התקצרות במקום שבו פני השטח של הגוף מתכווצים, ודוחסת מכתשים שלמים קרוב יותר זה לזה בלי למחוק אותם — ובלי להקטין אותם: המכתשים שומרים על קוטרם, וההתכווצות נבלעת ברווחים שביניהם (D.2). המכתשים הקוטביים צפופים ושלמים, כי הקליפה הייתה קשיחה והגוף שמתחתיה לא היה.

מה שורד את העיוות. מכתש על לוח קשיח אינו עובר עיוות כלל: ההתקצרות של פני השטח הקוטביים — כשליש ביחס לחגורה, וכמעט מחצית משטחם בקוטב עצמו — הפרוסה על פני עשרות מיליוני שנים (ההתעגלות פנימה נמשכה כ-100 מיליון), נכנסת אל המפרקים שבין הלוחות. מחיקה דורשת זרימה מקומית מהירה מן הקצב הזה בסדרי גודל, או פני שטח שנמסים. אף אחד מהם אינו חלק מן ההתעגלות.

הדרישה. הפנים היה חייב להיות מסוגל לעקוב אחר ההתהדקות — זמן הרפיה קצר לעומת השלב המחובר, צמיגות מתחת לכ- 10^{25} Pa s, שפנים חם ומותך בחלקו עומד בה בסדרי גודל — מתחת לקליפה קשיחה מספיק כדי לשמור על מכתשיה שלמים ובגודלם. בקצרה: קשיח מספיק בפני השטח כדי לשמור על מכתשיו, רך מספיק מתחת כדי להתעגל. תמונת שתי השכבות משאירה סימן שאפשר לחפש: מבני התקצרות המרוכזים לעבר הקטבים ומעטים יותר לעבר המשוואה, בלי חגורת מבני מתיחה במשוואה, ברמות ובצד הרחוק, שם הרכסים של הימות עצמם אינם מבלבלים את הספירה (E.3).

לאן הלכו פני השטח שנסגרו. ירידת הנפח מוסיפה דרישה שנייה. משיא של כ-1,700 ק"ג/מ"ק פני השטח הממוצעים של הגוף יורדים ברבע, ובקוטב כמעט במחצית (C.3). קליפה ששמרה על הנפח שלה הייתה מתעבה כשליש בסך הכול, ובערך פי 1.5 יותר בכיפות הקוטביות מאשר בחגורה. המודל דורש שהקליפה קלטה את פני השטח שנסגרו — בהתקצרות ובדחיקה, ובחלקם במעבר חומר אל הפנים — באופן שמשאיר את הקרום הקוטבי לא עבה מן החגורה, כפי ש-GRAIL מודד (C.3). כיצד עשתה זאת לא חושב כאן; זה רשום ב-E.3.

חלק D — מבחנים

חלק C הציע מנגנון: המכתשים נוצרו באופן אחיד על פני ירח צעיר ופחוס, הגוף התעגל כשעוד היה מחובר ומסתובב עם כדור הארץ, וההתעגלות כיווצה את פני השטח הקוטביים יותר מכל מקום אחר וסגרה שם את הרווחים בין המכתשים. חלק זה מעמיד את המנגנון מול תיעוד המכתשים בסדרה של מבחנים. כל מבחן מוצג באותו סדר: מה מושווה למה, ומדוע שני הצדדים דומים בכל דבר מלבד הדבר הנבדק; מה המודל חוזה, עם קו מעבר שנקבע מראש; מה נמדד; והתוצאה.

המנגנון של חלק C מנוסח כארבעה מבחנים (D.1–D.4), ועוד מבחן חמישי (D.5) שמעמיד את ההנחה המרכזית שלו — שהמכתשים שמרו על גודלם — ישירות מול הנתונים. הספים נקבעו לפני הספירות; ארבעתם חושבו על הקטלוג ועל מדגמי הגיל רק אחרי שהמנגנון נוסח, כך שקווי המעבר לא יכלו להיות מותאמים לתשובה. ההרצה הראשונה ספרה את הקטלוג כולו; כשהתברר שהימות מורידות את הצפיפות במשווה, מבחן הצפיפות הורץ מחדש באופן נקי, כשהימות ו-South Pole–Aitken מוסרים משני הצדדים (A.11), ומה שמדווח הוא הספירה הנקייה. "משני הצדדים" הוא הכלל של כל השוואה בחלק זה: כל קרקע שמוצאת מן הכיפות הקוטביות מוצאת גם מחגורת המשווה לפי אותו כלל, כך ששני האזורים נבדלים רק בקו הרוחב.

כל יחס שנמדד ניתן עם טווח ה-95% שלו, מלבד יחסי הצפיפות הנקיים הכתובים עם $\pm$ (D.1, D.2), שבהם המספר שאחרי $\pm$ הוא סטיית תקן אחת של הספירה וטווח ה-95% רחב בערך פי שניים. טווח ה-95% הוא טווח שנבנה כך שאילו חזרו על המדידה כולה פעמים רבות, הוא היה מכיל את הערך האמיתי ב-95 מכל 100 חזרות. יחס שהטווח שלו אינו כולל את 1 הוא הבדל מעבר למקרה. שתי שיטות משמשות כאן. ליחסים של ספירות, הטווח הוא הטווח המדויק (Clopper–Pearson) של החלוקה הבינומית בין שני האזורים, מוכפל ביחס השטחים שלהם: מכל המכתשים שנספרו בשני האזורים יחד, חלק מסוים נופל בכיפות; הטווח המדויק של החלק הזה, זה שחישוב של הטלות מטבע נותן בלי קירוב, מומר ליחס צפיפויות על ידי חלוקה ביחס בין שני השטחים. ליחסים של חציונים, הטווח הוא bootstrap של 20,000 דגימות חוזרות: המכתשים של כל אזור נשלפים מחדש באקראי, עם החזרה, 20,000 פעמים, היחס מחושב מחדש בכל פעם, ו-95% האמצעיים של התוצאות הם הטווח. ה-bootstrap אינו זקוק לשום הנחה על צורת התפלגות הגדלים; הוא נותן לנתונים להראות כמה החציון היה מתפזר ממדגם למדגם.

הטבלה מרכזת את חמשת המבחנים; הסעיפים שאחריה עוברים עליהם אחד אחד. העמודה "קו המעבר" נותנת את הסף שנקבע מראש, לפני הספירה.

מבחן	תחזית	קו המעבר	נמדד (טווח 95%)	תוצאה
D.1 יחס הצפיפות	כ-1.2–1.5, עולה ככל שהמכתשים נוצרו קרוב יותר לשיא; 1.21 לכל ≥ 20 ק"מ	1.6–1.1	0.05 ± 1.20 במכתשים של 20 ק"מ ומעלה (נקי; 95%: 1.30–1.10)	עובר
D.2 קטרים	המכתשים שומרים על גודלם; האוכלוסייה הקוטבית עשירה יותר במכתשים גדולים	> 1 חציון קוטבי	1.06 (1.12–1.01) ב-20 ק"מ, נקי	עובר
D.3 מכתשים צעירים	אין עודף קוטבי	≈ 1.0	0.92 (2.04–0.39) 1.12 (2.03–0.60)	מתיישב; עוד אינו מכריע

D.4 צפון ודרום	שני הקטבים דומים	אין הבדל שאינו מוסבר	דרום/צפון 1.02 (0.78–1.32) ב-15°	עובר
D.5 גודל המכתשים	המכתשים שמרו על גודלם	הגודל נשמר במבחי הגודל	הגדולים ביותר לשטח 1.16 (1.04–1.29); ישנים/טריים 1.02 (0.89–1.16)	עובר (4 מתוך 5)

טבלה: חמשת המבחנים של חלק D — תחזית, קו המעבר, מה שנמדד והתוצאה.

ארבעה מתוך החמישה עוברים במלואם; המכתשים הצעירים מתיישבים עם המודל אבל מעטים מכדי להכריע, D.3-1 אומר איזה מדגם יכריע אותם.

D.1 יחס הצפיפות

מה מושווה. מספר המכתשים ליחידת שטח בשתי הכיפות הקוטביות מול אותו מספר בחגורת המשווה. כיפה קוטבית של 30° היא האזור שבתוך 30° מן הקוטב, כלומר בקו רוחב 60° ומעלה, בצפון ובדרום; החגורה היא הרצועה שבתוך 15° מקו המשווה, $|\phi| < 15^\circ$. שני האזורים נספרים מאותו קטלוג, באותו סף קוטר, וכשאותה קרקע מוסרת משניהם (A.11). זה המבחן הראשון משום שזו התצפית שהמאמר יצא להסביר: אילו היחס הנקי היה 1, לא היה למנגנון מה לעשות.

תחזית. צפיפות המכתשים בין הקוטב למשווה, כיפות של 30° מול החגורה $|\phi| < 15^\circ$: בין כ-1.2 לכ-1.5, לפי כמה קרוב לשיא נוצרו המכתשים (C.3, C.5). מכתש שנוצר בשיא הפחיסות נישא דרך ההתעגלות כולה וקיבל את מלוא הציפוף, כ-1.5; מכתש שנוצר מאוחר בהתעגלות, על גוף שכבר היה כמעט עגול, קיבל ממנו מעט. לכל המכתשים של 20 ק"מ ומעלה, שרובם קטנים ונוצרו מאוחר, ערך סביב 1.2 — 1.21 לצורה שששת הציורים שלהם רושמים (A.9, C.3). **מעבר** (נקבע לפני הספירה): יחס נקי שנמצא בבירור מעל 1 ומתחת לכ-1.6.

הספירה, נעשית באופן נקי. הספירות הראשונות של המאמר הזה (חלק A) כוללות את הימות. הימות עניות במכתשים ושוכבות ברובן סמוך למשווה, ולכן הן מורידות את הצפיפות במשווה ומנפחות את היחס: עם הימות היחס הוא 1.32. ים הוא פתח מעל כיפת הזנה, שהיה חם עד הניתוק וקפא חלק אחריו; המכתשים שעמדו עליו הומסו, ורצפתו צעירה מן המכתשים הישנים. המסכה של LROC שמוסרת כאן כוללת גם את מישורי הבזלת, קרום שהותך בחום הכללי של כדור הארץ, שהתיעוד שלהם אופס באותו אופן. כשרצפות אלה נספרות בחגורה, הן מוסיפות שטח בלי להוסיף מכתשים ישנים, והחגורה נראית ריקה יותר מן הקרום הישן שלה. זה הבדל של קרקע, לא של קו רוחב, והוא חייב לצאת מן ההשוואה. הספירה הנקייה מסירה את הימות משני הצדדים, ומסירה גם את South Pole–Aitken, שמחק את המכתשים של רבע מן הכיפות הקוטביות (A.10, A.11). האגן פועל בכיוון ההפוך: הוא שוכב ברובו בכיפה הדרומית, וכשהוא נספר שם הוא מוריד את הצפיפות הקוטבית. הטבלה מראה את שלושת השלבים:

ספירה (מכתשים של 20 ק"מ ומעלה; כיפות מ-60° מול יחס $ \phi < 15^\circ$)	
הקטלוג כולו, כולל הימות	1.32
הימות מוסרות משני הצדדים	1.11 ± 0.04
הימות ו-South Pole–Aitken מוסרים	1.20 ± 0.05

טבלה: יחס הצפיפות בין הקוטב למשווה בשלושה שלבים של ניקוי הספירה.

קוראים את העמודה מלמעלה למטה: הסרת הימות מורידה את היחס מ-1.32 ל-1.11, משום שהיא מוציאה את המישורים הריקים שגרמו לחגורה להיראות דלילה; הסרת South Pole–Aitken מעלה אותו שוב ל-1.20, משום שהיא מוציאה את הקרקע שנמחקה וגרמה לכיפות להיראות דלילות. כל שלב מסיר קרקע אחת שאינה שייכת לשאלה, וכל אחד מופעל על שני האזורים באותה מידה. השורה האחרונה היא ההשוואה של דומה לדומה, והתוצאה נשענת עליה.

עובר: 1.20 ± 0.05 , בתוך התחום החזוי, סמוך לערך הצפוי לאוכלוסייה שנוצרה ברובה מאוחר, ולצד ה-1.21 שהצורה של ששת הצירים שלה חוזה.

מול מה שגשם מבחוץ חוזה. ההתנגדות הראשונה שמומחה יעלה היא שאולי הקטבים צפופים יותר פשוט משום שהגיעו אליהם יותר גופים. החישוב הזה נעשה, והוא נותן את הסימן ההפוך. גופים המגיעים מחוץ למערכת כדור הארץ-ירח – הגשם שעליו נשענים מודלי הפגיעה של ההפצצה – עושים את הקטבים דלילים יותר, לא צפופים יותר: מודלים של ההפצצה נותנים יחס בין הקוטב למשוואה של 0.91–0.90 (Le Feuvre & Gallant et al. 2009; Wieczorek 2008), ו-0.80 בגרסה מתוקנת מאוחרת יותר (Le Feuvre & Wieczorek 2011). הספירה הנקייה עומדת מעליהם בשש עד שמונה סטיות תקן; סטיית התקן כאן היא ה-0.05 של הערך הנמדד, כך שהפער בין 1.20 לבין הציפיות האלה הוא פי שש עד פי שמונה מן הפיזור של המדידה. במודל, הציפיות ההתחלתיות הייתה אחידה על פני הבליטה השטוחה – הקטבים של הירח העתידי קיבלו חומר כמו כל מקום אחר – וההתעגלות היא שציפפה אותה; שום גשם מבחוץ לא היה עושה זאת.

מדוע לא מתחת ל-20 ק"מ. מתחת ל-20 ק"מ ההשוואה אינה נעשית: שם הספירות נשלטות על ידי מכתשים משניים, ריסוס ורוויה, היחס יורד ב-10–20 ק"מ ועולה שוב ב-2–5 ק"מ מסיבות שאין להן קשר לצורת הגוף, וספירה של ריסוס אינה יכולה להיות מושווית לספירה של מכתשים (A.11). מכתשים משניים הם המכתשים הקטנים שיוצר החומר שנזרק ממכתש גדול יותר; ריסוס הוא השדה העדין יותר מאותו סוג; ופני שטח הם רוויים כשהם כה מלאים במכתשים קטנים שכל מכתש חדש מוחק מכתש ישן, כך שהספירה כבר אינה גדלה. אף אחד משלושת אלה אינו מתעד היכן היו פני השטח כשנפגעו, ולכן אף אחד מהם אינו יכול לשאת את החתימה של ההתעגלות.

D.2 קטרים

סעיף זה שואל את גדלי המכתשים שתי שאלות. הראשונה היא אם הציפוף עולה עם הגודל, כפי שהוא חייב לעלות אם המכתשים הגדולים נוצרו קרוב יותר לשיא; השנייה היא אם המכתשים שמרו על הקטרים שלהם בזמן שפני השטח שביניהם התכווצו.

היחס לפי גודל המכתש – השעון. אם גודלו של מכתש מספר את שלב היווצרותו, היחס חייב לעלות עם הגודל. הסיבה שגודל יכול לייצג את שלב ההיווצרות היא שהמכתשים הגדולים ביותר נוצרו סמוך לשיא, כשהפעילות של הפתחים הייתה בשיאה והגוף היה הפחוס ביותר (C.4), ושהאוכלוסייה גדלה אחר כך לכיוון גדלים קטנים יותר ככל שהפעילות ירדה. מכתש שנוצר בשיא נישא דרך ההתעגלות כולה; מכתש שנוצר מאוחר נישא רק דרך סופה. המבחן מחלק לכן את הספירה הנקייה לפי קוטר ושואל אם המכתשים הגדולים יותר הם המצופים יותר. כך הדבר. העמודה השלישית נותנת את הצורה שעליה מכתש היה צריך להיווצר כדי לקבל את הציפוף שנמדד: היחס שנמדד מורץ לאחור דרך הקשר של C.3 בין הצורה ההתחלתית לבין הציפוף שהיא יוצרת, על המשפחה התלת-צירית של C.3 עם $b - c$ ב-0.6 של $a - c$, וכשהכיפה התת-ארצית מוצאת מן החגורה בנתונים ובמודל כאחד, משום שדיסקת המגע דילדלה אותה מסיבה שאינה הצורה (C.3). הגוון הכחול מעמיק עם הפחיסות הנקראת לאחור.

קוטר	יחס נקי (ימות ו-SPA מוסרים)	נוצר על גוף בעל $a: b: c$	שלב (איור 13)
------	-----------------------------	---------------------------	---------------

מאוחזר בהתעגלות, ממש לפני השחרור	1.05 : 1.03 : 1	1.09 ± 0.07	30–20 ק"מ
מאוחזר בהתעגלות, סמוך לשחרור	1.11 : 1.07 : 1	1.15 ± 0.11	40–30 ק"מ
בהתעגלות	1.34 : 1.21 : 1	1.26 ± 0.12	60–40 ק"מ
בשיא (כ-1.8 : 1.4 : 1)	1.70 : 1.42 : 1	1.53 ± 0.19	100–60 ק"מ
בשיא, בתוך השגיאה	2.24 : 1.74 : 1	1.84 ± 0.38	300–100 ק"מ

טבלה: היחס הנקי לפי קוטר, והצורה והשלב שאליהם הוא מצביע.

קוראים את הטבלה מלמעלה למטה: ככל שהמכתשים גדלים, היחס הנקי מטפס מ-1.09 ל-1.53, והצורה שהם מצביעים עליה לאחר מטפסת מגוף כמעט עגול אל הפחוס ביותר. כאן $a:b:c$ הם הצירים לכיוון כדור הארץ, לאורך המסלול ודרך הקטבים, כשהקוטבי מוצב כ-1. המכתשים של 100–60 ק"מ מצביעים לאחר על 1.70 : 1.42 : 1, בתוך צורת השיא של כ-1.8 : 1.4 : 1 שששת הכיפות נותנות (C.3), וחלק הפיתה שלהם, 1.42, הוא הצורה שסיבוב של 5.5 שעות מרים על גוף של כ-1,700 ק"ג/מ"ק (C.1): המכתשים הגדולים ביותר שנספרו היטב משחזרים את צורת השיא. המכתשים הקטנים יותר מצביעים לאחר על 1.05 : 1.03 : 1 ועל 1.11 : 1.07 : 1, כמעט עגולים; הם נוצרו בחלקה האחרון של ההתעגלות, כשהצורה המשיכה להתעגל לכיוון הכדור שאליו הגיעה עד השחרור (C.5). מכתש נושא את הציפוף של הצורה שעליה נוצר; מכיוון שחומר הושלך גם במהלך הפחיסות, צורה בעלת יחס צירים נתון עברה גם בדרך מעלה אל השיא וגם בדרך מטה ממנו, ועמודת השלב נותנת את קריאת שיעון הגודל: ככל שהמכתש גדול יותר, היווצרותו קרובה יותר לשיא — קרובה יותר, לא בהכרח מוקדמת יותר. מאחורי הקלעים: העמודה הזו נקראה תחילה על צורת הסיבוב הפחוסה בלבד. ששת הצירים הראו אחר כך שהצורה הייתה תלת-צירית, ושהכיפה התת-ארצית מדולדלת בידי דיסקת המגע ולא רק בידי הצורה, ולכן הקריאה לאחר משתמשת עכשיו במשפחה התלת-צירית ומוציאה את הכיפה הזו משני הצדדים.

הטענה היא הסדר והתחום, לא התאמה שורה אחר שורה: השיוך של גודל לשלב נקרא מן הנתונים. הסדר — מכתשים גדולים יותר מצופפים יותר — והתחום — בין 1.0 (אחרי השחרור) לכ-1.5 (בשיא) — הם מה שההתעגלות חוזות, ומה שהספירה הנקייה מראה. המכתשים הגדולים ביותר מעטים (46 בכיפות, 50 בחגורה), ואגן אחד או שניים שסווגו בטעות מזיזים את היחס שלהם בכמה אחוזים; הערך שלהם מתיישב עם השיא בתוך השגיאה שלו. הצורה שלהם, 1 : 1.74 : 2.24, נמצאת מעבר לצורת השיא, אבל אי-הוודאות של היחס שלהם, ± 0.38 (סטיית תקן אחת), יורדת הרבה עד אליה.

הקטרים.

תחזית. המכתשים נישאו שלמים על קליפה קשיחה (C.7): הם שמרו על הקטרים שלהם, וההתכווצות של פני השטח הקוטביים סגרה את הרווחים שביניהם. התמונה היא קהל בכיכר שמתכווצת: האנשים עומדים צפופים יותר, אבל אף אחד אינו נעשה נמוך יותר. מכאן נובעות שתי תוצאות.

הראשונה: הציפוף נראה בסף קוטר קבוע — דבר שלא היה קורה אילו המכתשים היו מתכווצים יחד עם פני השטח. הסיבה טמונה באופן שבו מספר המכתשים תלוי בגודל. ההתפלגות המצטברת של גדלי המכתשים הירחיים בין 20 ל-100 ק"מ יורדת לפי $N(>D) \propto D^{-b}$ עם $b \approx 2$ (נמדד כאן: 1.8 בכיפות, 2.0 בחגורה). במילים: $N(>D)$ הוא מספר המכתשים הגדולים מ- D , ועם $b \approx 2$ חציית הקוטר מכפילה את המספר הזה בכ-4; מכתשים קטנים רבים בהרבה מגדולים. פני שטח שהתכווצו יחד עם המכתשים שלהם בגורם קווי s מרוויחים גורם $1/s^2$ בצפיפות המכתשים, אבל מפסידים גורם $s^2 \approx s^b$ מן המכתשים שלהם אל מתחת לסף; השניים מבטלים זה את זה, ולא היה נספר שום עודף קוטבי. התמונה היא צילום של פני השטח המודפס בקטן יותר: המכתשים עומדים צפופים יותר, אבל אלה שהיו ממש מעל הסף התכווצו אל מתחתיו ונושרים מן הספירה,

ועם $b \approx 2$ שני האפקטים שווים בדיוק. העודף שנמדד בספים קבועים הוא עצמו הראיה לכך שהמכתשים שמרו על גודלם.

השנייה: מאחר שהמכתשים הגדולים יותר נוצרו קרוב יותר לשיא והם המצופים יותר (הטבלה שלמעלה), האוכלוסייה הקוטבית היא העשירה יותר במכתשים גדולים, ובאותו סף החציון של הקוטר שלה גדול יותר. החציון הוא הקוטר שמחלק אוכלוסייה לשני חצאים; אוכלוסייה שמחזיקה חלק גדול יותר של מכתשים גדולים היא בעלת חציון גדול יותר.

נמדד (ספירה נקייה, הימות ו-South Pole–Aitken מוסרים; טווחי bootstrap של 95%, 20,000 דגימות חוזרות). הכיפות והחגורה מושוות באותו סף, כשאותה קרקע מוסרת משתיהן:

סף	כיפות קוטביות: N , חציון (ק"מ)	חגורה N , $ \phi < 15^\circ$, חציון (ק"מ)	יחס החציונים (טווח 95%)
20 ק"מ ומעלה	895, 32.5	1,498, 30.5	1.06 (1.01–1.12)
40 ק"מ ומעלה	327, 59.2	470, 56.0	1.06 (0.98–1.15)

טבלה: חציון הקוטר בכיפות ובחגורה באותו סף, בספירה הנקייה.

בשני הספים החציון הקוטבי הוא הגדול יותר, כפי ששעון הגודל דורש, וב-20 ק"מ הטווח שולל שוויון. ב-40 ק"מ היחס זהה, 1.06, אבל המדגם קטן בערך פי שלושה, והטווח שלו יורד מעט אל מתחת ל-1. **עובר**.

מאחורי הקלעים. הגרסה הראשונה של המאמר חזתה שהמכתשים הקוטביים התכווצו יחד עם פני השטח ב-9%, והורידה את הסף הקוטבי בגורם הזה כדי להשוות את החציונים; היא מצאה אותם שווים (0.995). אבל החציון של התפלגות גדלים מסוג זה נקבע על ידי הסף שלה: הורדת הסף ב-9% מורידה את החציון בכ-9%, יהיה מה שיהיה מה שעשו המכתשים, כך שההתאמה מדדה את הסף ולא את המכתשים. וההתכווצות עצמה, כפי שהוצג למעלה, הייתה מסתירה את הציפוף. הגרסה שכאן הולכת אחרי C.7: המכתשים שמרו על גודלם.

D.3 המכתשים הצעירים

מה פירוש "צעיר" כאן. המכתשים הצעירים הם אלה שנוצרו אחרי השחרור, כשהירח כבר היה גוף עגול בעל קליפה קשיחה וההתעגלות הסתיימה. הם הביקורת של המאמר כולו. הציפוף של D.1 אינו תכונה של המקום שבו מכתש נוחת; זה משהו שקרה לפני השטח אחרי שהמכתשים כבר היו עליהם, כשהצורה שמתחתם השתנתה. מכתש שנוצר על הכדור הגמור מעולם לא נישא על פני שטח מתכווצים, ולכן הוא לא אמור להראות שום ציפוף. אילו המכתשים הצעירים היו מצופפים בקטבים כמו הישנים, העודף היה שייך לקטבים עצמם — לאופן שבו חומר מגיע אליהם או שורד בהם — ולא להתעגלות.

תחזית. מכתש שנוצר אחרי שהירח היה עגול לא נע: האוכלוסייה הצעירה חייבת להיות אחידה בקו הרוחב. **מעבר:** יחס בין הקוטב למשווה בתוך כ-0.9–1.1. הקצה התחתון של הרצועה מכיל את החוסר הקוטבי הקל, 0.90–0.91, שמודלי ההפצצה נותנים לגופים המגיעים מבחוץ (D.1).

שני מדגמים. מכתש צעיר צריך להיות מתוארך כצעיר, ומעטים כאלה. קיימים שני מדגמים, שנבנו בדרכים שונות ונושאים הטיות שונות, כך שכל אחד בודק את השני. הראשון הוא המכתשים בני העידן הקופרניקני של LPI Lunar Impact Crater Database (Losiak et al., מעודכן 2015): 80 מכתשים בעלי שם הנושאים את התווית המפורשת, 65 מהם של 10 ק"מ ומעלה — אוסף מלוקט, ומוטה לצד הקרוב, משום שכך הם מכתשים בעלי שם. "קופרניקני" הוא שמה של התקופה הצעירה ביותר בהיסטוריה הגאולוגית של הירח, עידן המכתשים כמו Copernicus שהקרניים הבהירות שלהם עדיין חדות. השני הוא המדגם של 111: Mazrouei et al. (2019). מכתשים של 10 ק"מ ומעלה, צעירים מכמיליארד שנה, המתוארכים בשיטה פיזיקלית — שפע הגושים על פני

השטח כפי שנמדד על ידי Diviner, שדועך בקצב זמן ידוע — עם כיסוי אחיד מ-80° דרום עד 80° צפון. מכתש טרי זרוע גושים שנזרקו כשנוצר; עם הזמן הם נשחקים לאבק דק, והחלק של פני השטח שעדיין מכוסה בגושים, כפי שנקרא על ידי המכשיר התרמי Diviner שעל Lunar Reconnaissance Orbiter, נותן את הגיל. הרשימה המשמשת כאן היא קובץ הקלט של המחברים שהופקד ב-GitHub, ולא Table S1 שפורסמה, שלא ניתן היה להשיג; הגילים בהם ערכי העבודה של המחברים (שמונה מתוך 111 הם בני 1,000 מיליון שנה ומעלה, והטבלה ניתנת איתם ובלעדיהם). שטחי הכיפות והרצועה למדגם הזה נחתכים ב-80°, כך ששטח כל אזור תואם את הכיסוי של המדגם.

הטבלה סופרת כל מדגם בשתי הכיפות וברצועת המשווה, נותנת את מספר המכתשים ואת הצפיפות ל-10⁶ קמ"ר, ומסתיימת ביחס שהמבחן קורא:

אזור	LPI קופרניקני, $D \geq 10$ ק"מ: $N \times 10^{-6}$ / ל-10 ⁶ קמ"ר	Mazrouei, כל 111, $D \geq 10$ ק"מ	Mazrouei, גיל מתחת למיליארד שנה (103)
כיפה צפונית 30°	7 / 2.75	12 / 5.33	11 / 4.88
כיפה דרומית 30°	3 / 1.18	6 / 2.66	6 / 2.66
שתי הכיפות	10 / 1.97	18 / 3.99	17 / 3.77
רצועת המשווה $ \phi < 15^\circ$	21 / 2.14	35 / 3.57	32 / 3.26
צד קרוב / צד רחוק (ל-10 ⁶ קמ"ר)	—	2.84 / 3.11	2.52 / 3.00
קוטב / משווה	0.92	1.12	1.16

טבלה: המכתשים הצעירים בכיפות וברצועת המשווה, בשני המדגמים.

התוצאה, והמשקל שלה. המכתשים הצעירים אינם מראים עודף קוטבי בגודל של זה של האוכלוסייה הישנה: 0.92 באוסף המלוקט, 1.12–1.16 במדגם המתוארך פיזיקלית, מול 1.20 לאוכלוסייה הישנה בספירה הנקייה. ההשוואה היא דומה לבחינה האחת שחשובה כאן. המכתשים הצעירים נספרים על כל הקרקע, משום שהימות, הצעירות מן המכתשים הישנים, אינן מורידות אוכלוסייה צעירה: הימות הורידו את הספירה הישנה משום שהמכתשים הישנים שעליהן הומסו, אבל מכתש צעיר נוצר על ים באותה קלות כמו על הרמות, כך שלאוכלוסייה הצעירה הים הוא קרקע רגילה. שני המדגמים נופלים בתוך רצועת המעבר או סמוך לה. המדגמים קטנים — עשרה ושמונה-עשר מכתשים בקטבים — והטווחים אומרים זאת במפורש. הטבלה השנייה נותנת, לכל מדגם, את הטווח שלו ואת ההסתברות למדוד יחס נמוך כמו זה שנמצא אילו המכתשים הצעירים היו באמת מצופפים כמו הישנים (1.20 בספירה הנקייה, או 1.32 בספירה עם הימות):

מדגם	קוטב / משווה (טווח 95%)	אילו היחס האמיתי היה 1.20	הסתברות ליחס נמוך כזה ... אילו היה 1.32
LPI קופרניקני, $D \geq 10$ ק"מ	0.92 (0.39–2.04)	0.31	0.22
Mazrouei, כל 111	1.12 (0.60–2.03)	0.47	0.34
Mazrouei, מתחת למיליארד שנה (103)	1.16 (0.60–2.15)	0.52	0.39

טבלה: הטווחים של המדגמים הצעירים, וההסתברות לקבל יחס נמוך כזה מאוכלוסייה מצופפת.

ההסתברויות נעות בין 0.22 ל-0.52: מדגם בגודל הזה היה יכול לצאת נמוך כך גם מאוכלוסייה מצופפת, פעם אחת מכל שתיים עד פעם אחת מכל חמש. הטווחים, מכ-0.4 או 0.6 ועד כ-2, מכילים גם את 1.0 וגם את 1.2.

שני המדגמים נמצאים ברמת האוכלוסייה הישנה או מתחתיה, והם מסכימים זה עם זה למרות ההטיות השונות שלהם; אף אחד מהם אינו שולל את היחס הישן. המבחן מנוסח לכן כדרישה: כדי להפריד בין 1.0 ל-1.2 בשתי סטיות תקן נדרשים כ-150 מכתשים צעירים בכיפות ו-300 ברצועה — מדגם מתוארך גדול פי כמה מכל מדגם שפורסם עד היום. מדגם כזה הוא הפריט השני של העבודה הנוספת (E.3).

אחידים גם בקו האורך. המדגם של Mazrouei מוסיף דבר שני: הוא צפוף בצד הרחוק כמו בצד הקרוב (3.11 מול ל- 10^6 קמ"ר), כך שהאוכלוסייה הצעירה אחידה בקו האורך כמו בקו הרוחב; אותו דבר נכון ל-61 מכתשי הקרניים של Grier et al. (2001), כפי שלוקטו על ידי 2.01: Tai Udovicic et al. (2021) בצד הרחוק מול 1.70 בקרוב. מכתשי קרניים הם אלה שהפסים הבהירים סביבם עוד לא דהו, והם מן הצעירים ביותר על הירח; במודל הקרניים הן תיעוד מתחת לפני השטח, שנוצר רק על רצפה שכבר התקררה. מה שציפף את המכתשים הישנים בקטבים — ובצד העוקב של הימות (A.9) — חדל לפעול לפני שהצעירים נוצרו. זה מה שצורה קפואה חוזה, ומה ששימור לבדו אינו חוזה: אילו העודף הקוטבי היה עניין של קטבים ששומרים טוב יותר על המכתשים שלהם, גם המכתשים הצעירים היו נשמרים שם טוב יותר.

מדגם שלא נעשה בו שימוש. יחידות המכתשים הקופרניקיות של USGS Unified Geologic Map (Fortezzo et al. 2020; 222) נותנות צפיפות בצד הקרוב שגדולה פי ארבעה מזו של הצד הרחוק (9.2 מול 2.4 ל- 10^6 קמ"ר) — תכונה של המיפוי, שלוקט ממפות קודמות בפירוט לא שווה, ולא של הירח — ומאותה סיבה גם חוסר קוטבי (0.4–0.5 מן המשווה) שאי אפשר לקרוא כפיזיקלי. הצד הקרוב מופה ראשון ובפירוט רב יותר, ולכן מפה שלוקטה מן הגיליונות האלה מחזיקה יותר יחידות צעירות במקום שבו הממפים התבוננו בקפידה הרבה ביותר. מפות גאולוגיות אינן משמשות כאן כמערכי ספירה; הקטלוג הגאומטרי הוא שמשמש.

D.4 צפון ודרום

מה מושווה. צפיפות המכתשים בכיפה סביב הקוטב הדרומי מול אותה כיפה סביב הקוטב הצפוני, כיפה אחר כיפה מ- 10° עד 60° , אחרי שאותה מסכה של אגנים וימות הופעלה על שתיהן. שני הקטבים הם הזוג הנקי ביותר שהירח מציע: אותו קו רוחב, אותו מרחק מקו כדור הארץ, אותה תאורה ואותו קטלוג.

תחזית. המנגנון של חלק C סימטרי בין שני הקטבים: מה שעשה באחד עשה גם בשני. ההתעגלות פועלת סביב ציר הסיבוב, והציר עובר דרך שני הקטבים; כל קו אורך חוזר אל שניהם באותו אופן (C.3).

נמדד. לפני המסכה הכיפה הצפונית החזיקה 300 מכתשים ל- 10^6 קמ"ר בתוך 15° , והדרומית 215, והצפונית עלתה לכיוון הקוטב שלה בזמן שהדרומית נשארה שטוחה (A.6). להבדל הזה יש סיבה ידועה. South Pole–Aitken מכסה את רוב הכיפה הדרומית; בתוך 20° מן הקוטב הדרומי הוא הרכיב היחיד של המסכה. אחרי שהאגנים והימות מוסרים (A.7), שני הקטבים בכל כיפה:

כיפה	צפון, 20 ק"מ ומעלה	דרום, 20 ק"מ ומעלה	דרום / צפון (95%)	דרום / צפון, 40 ק"מ ומעלה (95%)
10°	298 (86)	348 (36)	1.16 (0.77–1.74)	1.26 (0.62–2.43)
15°	300 (194)	305 (84)	1.02 (0.78–1.32)	1.23 (0.79–1.89)
20°	270 (309)	280 (149)	1.04 (0.85–1.26)	0.94 (0.66–1.31)
30°	233 (560)	246 (322)	1.05 (0.92–1.21)	0.90 (0.71–1.15)
45°	232 (935)	246 (702)	1.06 (0.96–1.17)	0.90 (0.76–1.07)

60°	235 (1,515)	240 (1,178)	1.02 (0.94–1.10)	0.94 (0.82–1.08)
-----	-------------	-------------	------------------	------------------

טבלה: הקוטב הצפוני מול הקוטב הדרומי, כיפה אחר כיפה, אחרי מסכת האגנים והימות.

(צפיפויות ל- 10^6 קמ"ר, ספירות בסוגריים). קוראים כל שורה לרוחבה: שתי הצפיפויות קרובות, והיחס בין הדרום לצפון נשאר סמוך ל-1 ככל שהכיפה מתרחבת מ- 10° ל- 60° . בכל כיפה ובשני הספים הטווח מכיל שוויון. הסטייה הגדולה ביותר, ב- 10° בדרום, נשענת על 36 מכתשים בתוך טביעת הרגל של האגן, והטווח שלה נמשך מ-0.77 עד 1.74. הטווחים מצטמצמים ככל שהכיפות מתרחבות ומחזיקות יותר מכתשים; ב- 60° , עם יותר מאלף מכתשים בכל צד, היחס הוא 1.02 והטווח שלו 0.94–1.10.

עובר. מה ששני הקטבים חולקים שייך למנגנון; מה שלא חלקו לפני המסכה שייך לאגן. כשהקרקע האחת שנבדלת ביניהם מוסרת מן ההשוואה, שני הקטבים נושאים אותו ציפוף. מה ש-South Pole–Aitken עצמו מחזיק — מרכז עני במכתשים בתוך האגן (A.10) — הוא הנושא של מאמר 8.

D.5 האם המכתשים התכווצו? חמישה מבחני גודל

השאלה. D.2 נשען על טענה אחת: המכתשים נישאו על קליפה קשיחה ושמרו על גודלם בזמן שפני השטח שביניהם התכווצו. אילו המכתשים היו מתכווצים יחד עם פני השטח, ההתעגלות של C.3 הייתה מכווצת אותם באותו יחס. שתי התמונות הן קהל העומד צפוף יותר בכיכר קטנה יותר, מול צילום המודפס בקטן יותר; הראשונה שומרת על גובהם של האנשים, השנייה לא. מה היה גודל ההתכווצות? על הצורה הפחוסה של גרסה קודמת ($a/c = 1.69$), בממוצע על כל אזור של הספירה הנקייה, הגורם הקווי הוא 0.86 בכיפות ($|\phi| \geq 60^\circ$), 0.90 בטבעת 45° – 60° ו-1.08 בחגורה $15^\circ < |\phi|$: מכתש קוטבי היה בגודל **0.79** מזה של התאום שלו במשווה, ו-0.95 מזה של התאום שלו ממש מחוץ לכיפה. את הגורמים האלה, ואת העמודה "התכווץ" של הטבלה שלהלן הנשענת עליהם, יש לחשב מחדש לצורת השיא התלת-צירית, כ-1.8 : 1.4 : 1 (E.3); עד אז הם נשמרים כקנה המידה של המבחן. גורם קווי הוא השינוי באורך: 0.86 פירושו שכל אורך בכיפות על הגוף הפחוס היה נמדד על הכדור כ-0.86 מעצמו. הגורמים האלה נמדדים ביחס לשינוי של פני השטח בכללם; הגורם של החגורה הוא הגדול מבין השלושה, ופירושו שהמשווה התכווץ פחות מן הקטבים, והיחס בין השניים, 0.86 מול 1.08, נותן את ה-0.79. ההשוואה השנייה קטנה מכדי להראות; הראשונה לא. חמישה מבחנים שואלים את המכתשים ישירות מה קרה. כל החמישה משתמשים באזורים הנקיים של D.1 — הימות ו-South Pole–Aitken מוסרים משני הצדדים — כך שהכיפות והחגורה נבדלות רק בקו הרוחב.

העמדה של המאמר הזה. המכתשים שמרו על גודלם; לא הייתה התכווצות של המכתשים הקוטביים ב- $0.79 \times$. חמשת המבחנים בנויים כך שהתכווצות, אילו הייתה, הייתה נראית.

מאחורי הקלעים. קריאה מוקדמת יותר בסדרה הציגה את המכתשים שנישאו על הכיפה הנסגרת כמתכווצים בגורם גדול; המאמר הנוכחי מציג אותם כשומרים על גודלם, והשאלה הייתה צריכה להיות מוצגת לנתונים. השוואה של מספר המכתשים מעל סף אינה יכולה להכריע אותה — בהתפלגות גדלים עם $b \approx 2$ התכווצות וציפוף נראים אותו דבר (D.2) — ולכן המבחנים שלהלן מחפשים במקום זאת משהו בכל מכתש, או בצורת האוכלוסייה, ששינוי קנה מידה היה מזיז.

הטבלה מציגה, לכל מבחן, מה מושווה בין הכיפות לחגורה, מה חוזה כל אחת משתי התמונות, ומה נמדד:

מבחן	מה מושווה, כיפות מול חגורה	גודל נשמר	התכווץ	נמדד (95%)	תוצאה
------	----------------------------	-----------	--------	------------	-------

a. הגדולים ביותר בשטח שווה	חציון הקוטר של 20 המכתשים הגדולים ביותר ל- 10^6 קמ"ר	≈ 1.10	≈ 1.00	1.16 (1.29) -1.04)	נשמר
b. צורת המשפחה	מיקום הדבשת של התפלגות הגדלים (R-plot)	אותו מקום או גדול יותר	$\times 0.79$	קנה המידה המיטבי ≥ 1.09	נשמר
c. ישנים מול טריים	הגודל הממוצע של השליש השחוק ביותר חלקי השליש הטרי ביותר, כיפות חלקי חגורה	1.00	0.79	1.02 (1.16) -0.89)	נשמר
d. אליפטיות	חציון האליפטיות והכיוונית בקווי רוחב בינוניים ובחגורה, שבהם ההתעגלות אינה איזוטרופית	כמו בשאר המקומות	$+0.13$ – -0.40 ב- 30° – 55° עד $+0.69$ בחגורה, מכוונות	$+0.01$; החגורה כמו הכיפות	נשמר
e. הסרגל שבתוך המכתש	הקוטר של המעבר ממכתש פשוט למורכב	≈ 17 ק"מ	≈ 13 ק"מ	14–16.4 ק"מ	אינו מכריע

טבלה: חמשת מבחני הגודל — מה מושווה, מה חוזה כל תמונה, ומה נמדד.

בכל אחת מארבע השורות הראשונות הערך שנמדד נמצא עם העמודה "גודל נשמר" והרחק מן העמודה "התכווץ"; בשורה החמישית הוא נמצא בין השתיים.

(a) המכתשים הגדולים ביותר בשטח שווה — ההשוואה שהציע המחבר. מה מושווה: המכתשים הגדולים ביותר בשטחים שווים של כיפה וחגורה. שתי התחזיות: בשטח שווה הקטבים מחזיקים יותר מכתשים (D.1); אם הם שמרו על גודלם, הגדולים שבהם גדולים יותר, בכ- $1.10 = 1.20^{1/2}$; אם הם התכווצו עם פני השטח, הציפוף וההתכווצות מבטלים זה את זה והגדולים ביותר הם באותו גודל. השורש הריבועי בא מחוק הגדלים של D.2: עם $b \approx 2$, שטח שמחזיק פי 1.20 מכתשים מגיע לדירוג נתון — החמישי, העשירי או העשרים בגודלו — בקוטר גדול יותר בשורש של 1.20. נמדד: כשלוקחים את המכתשים הגדולים ביותר ביחס לשטח — 5, 10 ו-20 ל- 10^6 קמ"ר — חציון הקוטר הקוטבי חלקי המשווני הוא 1.02 (0.83–1.28), 1.11 (0.92–1.29) ו-**1.16** (1.04–1.29); מול הטבעת 45° – 60° : 0.91, 1.06 ו-1.16 (0.99–1.30). הממוצע נותן ערכים נמוכים יותר (0.81–1.02 מול החגורה) משום שהוא נישא על ידי כמה אגנים ענקיים בחגורה שהמסכה הנקייה משאירה; החציון אינו נישא כך. במדגם הגדול ביותר הטווח שולל את ההתכווצות: הקצה התחתון שלו, 1.04, עומד מעל ה-1.00 שההתכווצות חוזה.

(b) צורת המשפחה. מה מושווה: הצורה של התפלגות הגדלים בכיפות ובחגורה. לחוק חזקה טהור אין שום סימן עליו, ושינוי קנה מידה אינו יכול להיראות בו: חוק מן הצורה D^{-b} נראה אותו דבר בכל קנה מידה, כמו שקו חוף ישר נראה אותו דבר מכל גובה. להתפלגות של הרמות הירחיות יש סימן כזה: בגרף היחסי (R) היא עולה לדבשת ויורדת. ה-R-plot מחלק את הספירה בכל תא גודל במה שחוק חזקה עם $b \approx 2$ היה נותן שם, כך שחוק כזה מופיע כקו שטוח וכל סטייה ממנו בולטת; ברמות הסטייה היא דבשת בקוטר מסוים. שתי התחזיות: אוכלוסייה

שהתכווצה הייתה מעבירה את הדבשת שלה לקטרים קטנים יותר; אוכלוסייה ששמרה על גודלה הייתה שומרת את הדבשת שלה במקומה. נמדד: בכיפות הדבשת עומדת ב-80–113 ק"מ, באותו תא כמו בחגורה ומעל זה של הטבעת (57–80 ק"מ); היא גבוהה יותר, ולא מוזזת שמאלה. גורם קנה המידה שמניח בצורה הטובה ביותר את ההתפלגות הקוטבית על המשוונית הוא $1.09 \geq$ ב-95% — המשפחה הקוטבית היא, אם בכלל, הגדולה יותר. התכווצות הייתה דורשת גורם של 0.79.

(c) ישנים מול טריים, בתוך כל אזור. מה מושווה: המכתשים הישנים מול המכתשים הטריים בתוך אותו אזור, ואחר כך הכיפות מול החגורה. רק מכתשים שנוצרו לפני ההתעגלות יכלו להתכווץ; מכתש שנוצר אחריה מעולם לא נישא. לכן, אילו המכתשים הקוטביים היו מתכווצים, הישנים שבהם היו קטנים יותר ביחס לטריים מכפי שהם בחגורה. בתוך כל אזור דורגו המכתשים של 20 ק"מ ומעלה לפי יחס העומק לקוטר שלהם מול עקומה אחת שהותאמה לכל הירח הנקי (Wang & Wu 2021 [R12], עומקים ממודלי גובה ירחיים גלובליים), והשליש השחוק ביותר הושווה בגודלו לשליש הטרי ביותר. מכתש טרי עמוק ביחס לרוחבו; עם הזמן השפה שלו נשחקת והרצפה שלו מתמלאת, והוא נעשה רדוד יותר. יחס העומק לקוטר, כשהוא נקרא מול מה שמקובל למכתש בגודל הזה, מדרג לכן את המכתשים מן הטרי ביותר עד השחוק ביותר. השחיקה תלויה בגודל באותו אופן בכל מקום, ולכן ההשוואה נעשית כיחס כפול, כיפות חלקי חגורה: יחס הגודל בין ישנים לטריים בכיפות חלקי אותו יחס בחגורה. כל מה שקושר גיל וגודל באותו אופן בשני האזורים מתבטל, ומה שנשאר הוא ההשפעה של קו הרוחב. נמדד: $1.02 (0.89-1.16)$. התכווצות של האוכלוסייה הישנה הייתה נותנת 0.79, הרחק מתחת לטווח.

(d) אליפטיות. מה מושווה: צורת קווי המתאר של המכתשים בקווי רוחב בינוניים מול הכיפות והחגורה. האליפטיות של מכתש היא היחס בין הקוטר הארוך ביותר שלו לקצר ביותר; למעגל יש 1.0. ההתעגלות איזוטרופית בקוטב — שם היא משנה אורכים באותה מידה בכל כיוון — והרחק מן הקוטב היא מקצרת את קו הרוחב יותר מאת קו האורך (C.3), באופן הלא אחיד ביותר במשווה; מכתש שנישא ועוות יחד עם פני השטח היה עוזב את 30° – 55° עם אליפטיות גדולה פי 1.13–1.40 ממה שנוצר איתה, ואת המשווה עם עד פי 1.69 (יחס הצירים עצמו; הערכים האלה הם בסולם הפחוס ויש לחשב אותם מחדש לצורה התלת-צירית), וכל מכתש כזה היה מכוון לאורך קו האורך (גרסה קודמת נתנה 1.08–1.13 בקווי הרוחב הבינוניים וראתה במשווה מקום איזוטרופי). מעגל המצויר על גיליון הנלחץ יותר בכיוון אחד מבשני הופך לאליפסה, וכל מעגל על הגיליון הופך לאליפסה המצביעה לאותו כיוון. נמדד: חציון האליפטיות של מכתשים של 20 ק"מ ומעלה (Robbins 2019), הקטלוג כולו) הוא 1.087 בכיפות, 1.10 ב- 30° – 60° ו-1.090 בחגורה: בקווי הרוחב הבינוניים העודף הוא כ-0.01, עשירית מן העיוות או פחות, והחגורה, שבה העיוות היה הגדול ביותר, אינה מוארכת יותר מן הכיפות. נשאר כינוניות של המכתשים המוארכים ביותר ($e > 1.2$) לאורך קו האורך ב- 30° – 60° (45%–51 מול 20%–25 לאורך קו הרוחב), והיא מושארת ל-E.2, כשגאומטריית התצפית היא החשודה הראשונה.

(e) הסרגל שבתוך המכתש. מה מושווה: הקוטר שבו צורת המכתש משתנה, בכיפות מול החגורה. הקוטר שבו מכתש עובר מקערה פשוטה לצורה מורכבת עם פסגה מרכזית נקבע כשהמכתש נוצר, על ידי הכבידה וחוזק החומר; הוא פועל כסרגל המובנה בכל מכתש. מכתש שהתכווץ מאוחר יותר שומר על צורתו, ומכתשים כאלה היו מראים מכתשים מורכבים מתחת למעבר הרגיל: מכתש שנולד ממש מעל המעבר, עם הפסגה המרכזית שלו, ואחר כך התכווץ, היה מראה פסגה בקוטר שבו למכתשים טריים אין פסגה. שתי התחזיות: כ-17 ק"מ בכיפות אם המכתשים שמרו על גודלם, כמו בחגורה; כ-13 ק"מ אם התכווצו. נמדד: התאמת השבר ביחס העומק לקוטר של המכתשים הטריים ביותר נותנת 16.4 ק"מ בכיפות בשיטה אחת (15.8–17.1) ו-14.0 ק"מ בשיטה אחרת (13.0–15.2), מול 16.8–16.9 ק"מ בחגורה; ההתכווצות חוזה כ-13 ק"מ. שתי השיטות אינן מסכימות בכיפות, שבהן המכתשים רדודים יותר באופן כללי, והמכתשים הטריים ביותר שקובעים את השבר צעירים ברובם מן ההתעגלות — הם מעולם לא נישאו, ולכן אינם יכולים לשאת את סימן ההתכווצות לכאן או לכאן. המבחן מנוסח כדרישה: ספירה של מכתשים בעלי פסגה מרכזית מתחת ל-15 ק"מ בכיפות מול החגורה (מאמר 12, נושאי מחקר). עודף של מכתשים כאלה בכיפות יהיה הסימן של התכווצות.

עובר. ארבעה מתוך חמשת המבחנים מוצאים שהגודל נשמר; אף אחד אינו מוצא את ההתכווצות. המכתשים נישאו על הקליפה, וההתעגלות סגרה את הרווחים שביניהם.

מה שיש בידינו עכשיו. הספירה הנקייה, כשהימות ו-South Pole–Aitken מוסרים משני הצדדים, נותנת עודף קוטבי של 0.05 ± 1.20 , הפוך בסימנו למה שגשם מבחוץ נותן; העודף עולה עם גודל המכתשים, והמכתשים הגדולים ביותר שנספרו היטב מצביעים לאחור על שיא הפחיסות; המכתשים הקוטביים גדולים יותר, לא קטנים יותר; שני הקטבים דומים ברגע שהאגן ממוסך; והמכתשים הצעירים, שנוצרו על הכדור הגמור, אינם מראים עודף בתוך מה שהמדגמים הקטנים שלהם יכולים לומר. קווי המעבר נקבעו כולם לפני הספירות.

חלק E — מה נשאר

חלק E חותם את המאמר. חלקים A–D מדדו היכן עומדים המכתשים של הירח, הציגו את המנגנון שאנו מציעים לציפוף שלהם בקטבים, ובחנו אותו. החלק הזה מרכז את התוצאה בשלושה שלבים: מה המנגנון מסביר, עם המספר שחזה והמספר שנמדד (E.1); מה נמדד כאן אך אינו נגזר מן המנגנון בצורתו הנוכחית (E.2); ואיזו עבודה נוספת תחدد אותו או תרחיב אותו (E.3). בחלק הזה לא נמדד דבר חדש; כל מספר בו לקוח מן הסעיף המצוין לצדו.

E.1 מה מוסבר

תהליך אחד — ההתעגלות פנימה של הירח הצעיר והפחוס, בירידת נפח, שהתרחשה בזמן שהגוף עדיין היה מחובר ומסתובב עם כדור הארץ — מסביר את הדברים הבאים, וכל אחד מהם עם מספר שחושב לפני הספירה שאליה הוא מושווה. השלבים היו אלה: מסה סיאלית התאספה בקצה האגס והחלה לצאת ולהיפחס על בסיס ברוחב 6,000 ק"מ; כשהבסיס הצטמצם לעבר 3,000 ק"מ הגוף נע החוצה וקיבל צורה וגוף משלו, מתוח בין הכבידה של כדור הארץ על הצד הקרוב שלו (פנימה) לבין המשיכה הצנטריפוגלית של הקורוטציה (החוצה); הפחיסות הייתה הגדולה ביותר כשהתקרב לבסיס של 3,000 ק"מ, סמוך לקו הקורוטציה, שם הצורה הייתה תלת-צירית, כ-1.8 : 1.4 : 1, והגוף המתוח נפוח, בכ-1,700 ק"ג/מ"ק; ברגע שמרכז המסה שלו עבר את הקו המשיכה נטו שלחצה אותו על הבסיס ירדה לאפס, והגוף התעגל בירידת נפח, לכ-1.20 מאוחר בהתעגלות, והפחיסות נעלמה כשהגוף שוחרר: הירח התחיל להיפרד כשמרכז המסה שלו הגיע לקו הקורוטציה — המרחק שבו גוף שמסתובב עם כדור הארץ כבר נע במהירות של מסלול חופשי — ושוחרר כ-210 ק"מ מעבר לו; הגוף היה עגול (יחס צירים של 1.04 לכל היותר, מאמר 2, B.7§), מוחזק על ידי קליפה קשיחה. ההתעגלות שציפפה את המכתשים התרחשה אפוא בזמן שהירח היה מחובר. אנו מציעים שהניתוק חשף את הפתחים של האגס — הפקק יצא — ושחרר את הלחץ, כך שהאגס חזר במקום להמשיך להתארך, לא שוחרר ירח שני, וחומר התפזר לכל הכיוונים על הירח (C.6). אחרי השחרור הסיבוב הנעול הואט ככל שהירח התרחק; מה שהשתנה אז היה רק הבליטה הקטנה, הגאותית והסיבובית, של גוף שכבר היה קשיח, ולא הפחיסות המוקדמת (C.5).

יחס הצירים a/c שבו משתמשים לאורך כל המאמר הוא הרדיוס המשווני חלקי הרדיוס הקוטבי: 1.00 הוא כדור, וככל שהמספר גדול יותר הגוף פחוס יותר; צורת השיא תלת-צירית, $a:b:c$, עם הציר הארוך לכיוון כדור הארץ, הבינוני לאורך המסלול והקצר דרך הקטבים. "ירידת נפח" פירושה שהגוף לא איבד חומר ולא קיבל חומר בזמן ההתעגלות, אלא שחרר את המתיחה שלו ונעשה קטן וצפוף יותר, מכ-1,700 ל-2,600 ק"ג/מ"ק; גם הצורה השתנתה, ופני השטח היו צריכים לסדר את עצמם מחדש בהתאם — הקטבים נסגרים יותר מכל והמשווה פחות מכל. המבחן קורא רק את היחס הזה. הטבלה מונה את שש התצפיות שהמנגנון מסביר. יש לקרוא כל שורה לרוחבה: העמודה "נחזה" היא מה שהמנגנון נתן לפני שהמכתשים נספרו; "נמדד" הוא מה שהספירה הנקייה מצאה; "היכן" הוא הסעיף שבו מוצגים החישוב והמבחן.

תצפית	נחזה	נמדד	היכן
העודף הקוטבי	כ-1.2–1.5, עולה ככל שהמכתשים נוצרו קרוב יותר לשיא; 1.21 לכל ≥ 20 ק"מ	0.05 ± 1.20 בספירה נקייה (הימות ו-SPA מוסרים); $1.09 \rightarrow 1.53$ עם גודל המכתש	C.3, D.1, D.2

המכתשים הקוטביים גדולים יותר בחציון	המכתשים שומרים על גודלם; הגדולים יותר, שנוצרו קרוב יותר לשיא, צופו יותר	חציון קוטבי 1.06 (1.12) באותו סף D.2 –1.01
שני הקטבים דומים	שווים	דרום/צפון 1.02 (1.32) ב-15°; שווים בכל כיפה D.4 –0.78
הסדר של ששת הצירים	הקטבים והצדדים מעל קצות קו כדור הארץ; בקריאה כצורה ששת הכיפות נותנות 1.37 : 1.15 : 1.21, שחוצה 1.21	הנקודה התת-ארצית הדלילה ביותר (148 אחרי המסכה); עודף קוטבי נקי A.9, C.3 1.20–1.19
האוכלוסייה הצעירה	אין עודף קוטבי	0.92 ו-1.12 בשני מדגמים: עקבי, עדיין לא מכריע D.3
הרגע הפחוס ביותר	בהתקרבות לבסיס של 3,000 ק"מ, סמוך לקו, כ-1.8 : 1.4 : 1 בכ-1,700 ק"ג/מ"ק	נקרא בחזרה מן המכתשים של 100–60 ק"מ (1.70) : 1.42 : 1; חלק הפיתה הוא צורת הסיבוב ב-1,600–1,750 ק"ג/מ"ק C.1, C.3, D.2

שש התצפיות שהמנגנון מסביר: מה נחזה לפני הספירה, מה נמדד בספירה הנקיה, והסעיף שבו מוצגים החישוב והמבחן.

כל שורה, כממצא וכמשמעותו:

- 1. בקטבים יש יותר מכתשים מאשר במשווה, והעודף גדל עם גודל המכתש (C.3, D.1, D.2).** ממצא: בספירה הנקיה — הימות ו-South Pole–Aitken מוסרים גם מן הכיפות הקוטביות וגם מן החגורה המשוונית, כך ששני הצדדים מושווים באופן שווה — בכיפות הקוטביות צפיפות המכתשים היא פי 1.20 ± 0.05 מזו של החגורה, למכתשים של 20 ק"מ ומעלה. בחלוקה לפי גודל היחס עולה מ-1.09 למכתשים של 20–30 ק"מ ל-1.53 למכתשים של 60–100 ק"מ. משמעות: פני שטח שמתכווצים בקטבים כשגוף פחוס נעשה עגול דוחסים את המכתשים שעליהם קרוב יותר זה לזה שם. קו המעבר, 1.6–1.1, נקבע לפני הספירה, והערך שנמדד נמצא בתוכו, לצד ה-1.21 שהצורה של ששת הצירים של אותם מכתשים חוצה. העלייה עם הגודל היא סדר ההיווצרות הנקרא בחזרה: המכתשים הגדולים נוצרו קרוב יותר לשיא, על גוף פחוס יותר, ועברו חלק גדול יותר מן ההתעגלות. גשם של גופים מחוץ למערכת כדור הארץ-ירח עושה את הקטבים דלילים יותר, ולא צפופים יותר (0.80–0.91 במודלים המצוטטים ב-D.1), ולכן העודף אינו מה שהתמונה הזאת חוצה.
- 2. באותו סף גודל, המכתשים הקוטביים הם הגדולים יותר (D.2).** ממצא: עם אותו גבול תחתון של 20 ק"מ בשני הצדדים, הקוטר החציוני של המכתשים הקוטביים הוא פי 1.06 מזה של המשווניים (רווח 95%: –1.01–1.12; הרווח הוא התחום שבו נמצא הערך האמיתי ברמת ביטחון של 95%, וכאן הוא אינו כולל שוויון). משמעות: המכתשים נישאו שלמים על קליפה נוקשה ושמרו על גודלם, ואילו הרווחים ביניהם נסגרו. אילו התכווצו יחד עם פני השטח, החציון הקוטבי היה קטן יותר, ולא גדול יותר. ומאחר שהמכתשים הגדולים נוצרו קרוב יותר לשיא והם המצופפים יותר, האוכלוסייה הקוטבית עשירה יותר במכתשים גדולים, וזה מה שהחציון מראה.

- 3. שני הקטבים דומים (D.4).** ממצא: אחרי שהאגנים והימות מוסרים, יחס הצפיפות דרום לצפון הוא 1.02 (1.32–0.78) בכיפות של 15°, והרווח כולל שוויון בכל גודל כיפה שנבדק. משמעות: ההתעגלות סימטרית

סביב ציר הסיבוב; מה שעשתה בקוטב אחד עשתה גם בשני. ההבדל בין הקטבים שנראה לפני המסכה שייר ל-South Pole–Aitken, ולא למנגנון.

4. **ששת הצירים עומדים בסדר שנחזה (A.9, C.3).** ממצא: מבין שש הנקודות העיקריות של הירח — הנקודה התת-ארצית (הנקודה שמתחת לכדור הארץ), הנקודה שמולה, שני הקצוות של כיוון התנועה במסלול (המוביל והמאסף) ושני הקטבים — הנקודה התת-ארצית היא הדלילה ביותר (148 מכתשים למיליון קמ"ר אחרי המסכה), והקטבים והצדדים עומדים מעליה. משמעות: הגוף המחובר נמתח לאורך הקו אל כדור הארץ, בין הכבידה של כדור הארץ על הצד הקרוב שלו לבין המשיכה הצנטריפוגלית של הקורוטציה, בנוסף לכך שנפחם; בהרפיה הקצוות של הקו הזה התכווצו הכי מעט, והטבעת העוברת דרך הקטבים והצדדים התכווצה הכי הרבה, ואזור המגע של מאמר 3 נמצא בצד הקרוב, סביב 24° צפון 335° מזרח, בין הנקודה התת-ארצית לצפון. בקריאה כצורה, ששת הכיפות נותנות את הצורה 1.37 : 1.15 : 1 לכל המכתשים של 20 ק"מ ומעלה, והצורה הזו חוזרת את העודף הקוטבי הנקי, 1.21 מול 1.19–1.20, בלי שום כיוונון (A.9, C.3).

5. **המכתשים הצעירים אינם מראים עודף קוטבי (D.3).** ממצא: שני מדגמים של מכתשים צעירים — מכתשים שנוצרו זמן רב אחרי שהירח היה עגול — נותנים יחסי קוטב למשווה של 0.92 ו-1.12. משמעות: מכתש שנוצר אחרי שהצורה קפאה לא נישא מעולם על פני שטח מתכווצים, ולכן אינו אמור להראות ציפוף. שני המדגמים מסכימים עם זה, אבל הם קטנים (עשרה ושמונה-עשר מכתשים בכיפות), ואף אחד מהם אינו שולל את ה-1.2 של האוכלוסייה הוותיקה. המבחן עקבי עם המנגנון ועדיין אינו מכריע; D.3 מציין את המדגם שיכריע אותו.

6. **הרגע הפחוס ביותר משוחזר מן המכתשים הגדולים ביותר (C.1, C.5, D.2).** ממצא: המכתשים של 60–100 ק"מ נושאים את הציפוף של הצורה 1.70 : 1.42 : 1. משמעות: המנגנון ממקם את הרגע הפחוס ביותר כשהגוף התקרר לבסיס של 3,000 ק"מ סמוך לקו הקורוטציה, ממש לפני ההתעגלות פנימה, בכ-1.8 : 1.4 : 1, שחלק הפיתה שלה הוא הצורה שסיבוב של 5.5 שעות מרים על גוף של 1,600–1,750 ק"ג/מ"ק (C.1) — הגוף הנפוח שירידת הנפח דורשת. המכתשים הגדולים ביותר מצביעים על אותו רגע בתוך תחום השגיאה.

הצורה של האוכלוסייה כולה נקראת מששת הצירים וחוזרת את הספירה הנקייה בלי שדבר הותאם לה; צורת השיא נקראת מן המכתשים הגדולים, וחלק הסיבוב שלה נבדק מול יחס Maclaurin בקצב הסיבוב של מאמר 2 לצפיפות שירידת הנפח מתירה; הגורמים של C.3 נובעים מן הצורה בגאומטריה. יחס Maclaurin הוא החוק הקלסי שנותן את הצורה של גוף נוזלי אחיד המסתובב בקצב נתון: לקצב סיבוב ולצפיפות ידועים הוא קובע את יחס הצירים, בלי שום פרמטר חופשי. קצבי הסיבוב והצפיפויות נלקחו מן המאמרים הקודמים של הסדרה, וההמרה של צורה לגורם ציפוף היא גאומטריה טהורה. מה שנקרא מן הנתונים, ולא נחזה, הוא השיך של כל גודל מכתש לשלב (D.2): המנגנון אומר שמכתשים גדולים יותר נוצרו קרוב יותר לשיא ולכן מצופפים יותר, אבל איזה גודל נוצר באיזה רגע נלמד מן הספירה. הקליפה של C.7 היא הקליפה שמאמר 3 דרש מסיבה אחרת: שם נדרשה צמיגות של 10^{23} פסקל-שנייה ומעלה כדי שהמכתשים שנוצרו בזמן שהגוף עדיין היה על כדור הארץ ישרדו; כאן אותה קליפה נוקשה היא שמאפשרת למכתשים לשמור על גודלם בזמן שפני השטח שמתחתם מתכווצים. דרישה אחת משרתת שני מאמרים.

מה יש בידינו עכשיו. תהליך אחד, הנקבע על ידי מספרים שנלקחו מן המאמרים הקודמים ועל ידי הצורה שהמכתשים רושמים סביב ששת הצירים, מסביר את הצפיפות, את סדר הגדלים, את הסימטריה ואת סדר הצירים של המכתשים הוותיקים, ועקבי עם המכתשים הצעירים האחידים.

E.2 מה אינו מוסבר כאן

במהלך המאמר נעשו חמש תצפיות שהמנגנון בצורתו הנוכחית אינו גוזר. הן מפורטות כאן, כל אחת עם מה שידוע ועם מה שיכריע אותה, כדי שלא ייחשבו בטעות לחלק מן התוצאה.

- **העודף בצד המאסף.** הצד שסביב 90° מזרח צפוף יותר מן הצד שסביב 90° מערב, פי 1.96 לפני המסכה ופי 1.45 אחריה (A.9). הצד המאסף הוא החצי של הירח הפונה לאחור במסלולו; הצד המוביל פונה קדימה. העודף אינו איסוף של חומר על ידי הפנים המובילות, שכן הפנים המובילות הן הדלילות יותר. המודל נותן לו שתי סיבות. המתאם שלו עם הימות של אותו צד מוצג: סביב 90° מזרח יש יותר ימות, ובמודל ים הוא פתח שדרכו הושלך חומר עמוק, שחזר ונחת סביבו. הסיבה השנייה היא חומר מפתחים במקומות אחרים שפיגר אחרי הסיבוב ונחת מאחור, בצד המאסף (A.9.4; מאמר 6). חישוב ההשלכה והחזרה שיקשר ביניהם — היסטוריית ההשלכה של כל פתח, המעופים ותפוקת המכתשים — מופיע ב-E.3 של המאמר הזה (פריט 8), יחד עם גאומטריית הנחיתה של מאמר 6, חלק K. עד שהחישוב הזה יעשה, הקשר הוא דרישה של המודל, ולא תוצאה.
- **הכתר של הצד הרחוק.** לפי הגאומטריה של C.3 שני הקצוות של הקו אל כדור הארץ היו צריכים לקבל פחות; הנקודה שמול כדור הארץ צפופה (221 אחרי המסכה). ב-C.3 שני הקצוות של הקו כדור הארץ-ירח הם פני השטח הפחות מתוחים של הצורה הגאותית, ולכן פני השטח שמתכווצים הכי מעט בהרפיה: שניהם היו צריכים להיות דלילים. הנקודה התת-ארצית אכן כזאת (148); הנקודה שמולה אינה כזאת. המאמר מנסח זאת כדרישה — הכתר של הכיפה של מאמר 3 לא התכווץ כקצה חופשי — ואינו גוזר זאת. מה הכתר עשה במקום זאת, בזמן שהגוף היה מחובר, היא שאלה לצורה של גוף המוחזק בבסיסו (E.3, פריט 5).
- **מכתשים קוטביים רדודים יותר.** מדידה ראשונית מוצאת שהמכתשים הקוטביים של 20–100 ק"מ רדודים יותר מן המשווניים (יחס עומק לקוטר של כ-0.062 לעומת 0.074 ב-20–30 ק"מ), אבל לא אלה של 100–300 ק"מ. יחס העומק לקוטר הוא העומק של מכתש חלקי רוחבו; מכתש טרי הוא עמוק, והוא נעשה רדוד יותר ככל שקרקעיתו מתמלאת ושפתו נשחקת. אם זה הקיצור של הקליפה סביב המכתשים (C.7) או שחיקה מאוחרת יותר — זה אינו מופרד כאן. שתי הקריאות היו משאירות סימנים שונים — מבני קיצור סביב המכתשים, או ההתרככות הרגילה של הגיל — והמדידה שמבחינה ביניהן לא נעשתה.
- **כיוונויות בקווי רוחב בינוניים.** המכתשים המוארכים ביותר ($e > 1.2$) ב- 30° – 60° מונחים לאורך קו האורך (המרידיאן) לעתים קרובות יותר מאשר לאורך קו הרוחב (45%–51% לעומת 20%–25%); בחגורה ההעדפה הפוכה (D.5). כאן e היא האליפטיות, הציר הארוך של שפת המכתש חלקי הציר הקצר שלה; קו אורך עובר מצפון לדרום, וקו רוחב ממזרח למערב. גודל האפקט הוא עשירית או פחות ממה שעיוות יחד עם פני השטח היה נותן: D.5(d) מצא שהאליפטיות החציונית בקווי רוחב בינוניים גבוהה בכ-0.01 בלבד, לעומת 0.13–0.40 למכתשים שעוותו יחד עם פני השטח (גרסה קודמת נתנה 0.08–0.13). התאורה של התמונות ששימשו לשרטוט השפות היא ההסבר הראשון שיש לשלול: בתמונות המוארות בשמש נמוכה, שפה הפונה אל האור ושפה הנמצאת בצל משורטטות באופן שונה, וזה יכול לגרום למכתשים להיראות ארוכים יותר בכיוון אחד. אם הכיווניות שורדת בתמונות המוארות מכיוונים אחרים, היא תכונה מדודה של המכתשים, והיא דורשת הסבר.
- **המרכז של South Pole–Aitken.** בתוך האגן, אזור מרכזי רחב מכיל 0.59 מן הצפיפות שממש מחוץ לשפתו (A.10). South Pole–Aitken הוא האגן הגדול שבדרום הצד הרחוק; הייחוס כאן הוא הטבעת שממש מחוץ לשפתו, כך שמרכז האגן מכיל כשלוש חמישיות מן המכתשים של סביבתו שלו. הדבר נמדד כאן ומועבר למאמר 8 (South Pole–Aitken), שנושאו הוא האגן עצמו.

E.3 עבודה נוספת

- הפריטים שלהלן הם הצעדים שיהפכו את החלקים הנותרים של המנגנון מדרישות לחישובים, או ירחיבו את המבחינים שלו. בכל פריט, המשפט האחרון אומר מה הוא יראה.
1. **הצורה עם חוזק.** הצורות של C.1–C.2 הן צורות של נזל; גוף עם קליפה נוקשה מקבל מתיחה קטנה יותר. צורה עם חוזק לאורך ההתעגלות תצמצם את טווח התחזית מלמטה. מה זה יראה: כמה מן הפחיסות של

הנוזל גוף עם קליפה נוקשה קיבל בפועל, ומכאן את העודף הקוטבי הנמוך ביותר שהמנגנון יכול לתת — תחזית צרה יותר להעמיד מול ה-1.20 שנמדד.

2. **המכתשים הצעירים, רשימה מאומתת.** טבלה S1 שפורסמה של Mazrouei et al (2019), במקום קובץ הקלט של המחברים ששימש ב-D.3; ו-1,615 המכתשים בעלי הקרניים של Werner & Medvedev (2010), שהקואורדינטות שלהם לא הושגו. מכתשים בעלי קרניים הם מכתשים שעדיין מוקפים בפסים בהירים, סימן לצעירות. *מה זה יראה:* אם האוכלוסייה הצעירה אחידה בקווי הרוחב במדגם מאומת וגדול יותר, וזה יקרב את המבחן של D.3 לגודל שיכול להכריע אותו.

3. **ההרפיה בשתי שכבות, פתורה.** ההערכה של C.7 — גוף של 10^{21} – 10^{22} פסקל-שנייה מתחת לקליפה של 10^{23} — תיפתר כבעיה של שתי שכבות לאורך השלב המחובר, ותיתן את ההתכווצות שהושלמה ואת המעוות בקליפה. פסקל-שנייה (Pa s) היא יחידת הצמיגות; 10^{21} הוא בערך הצמיגות של המעטפת של כדור הארץ היום. *מה זה יראה:* כמה מן ההתכווצות הפנים השלים, וכיצד הקליפה הנוקשה קלטה את השאר — כמה היא התקצרה בקטבים וכמה פחות במשווה — במקום הערכת סדר הגודל של C.7.

4. **שני נושאים שהונחו בצד, למחקר שאינו של המודל הזה.** האליפטיות של המכתשים — אם ההתכווצות השאירה הארכה כלשהי, בקטבים או בכיוון אליהם — והעודף הקוטבי כשהוא נמדד מול חגורת השוליים של מאמר 11 ולא מול המשווה (החגורה בלי החלקים הקוטביים שלה מכילה כ-149 מכתשים למיליון קמ"ר, לעומת 219 בכיפות). שניהם נבחנו והונחו בצד: הם עניין למחקר בפני עצמו, עם הגדרות משלו לאזור ולצורה, ולא למאמר הזה. *מה זה יראה:* בהגדרות משלו, הראשון יאמר אם נשארה במכתשים הארכה כלשהי מעבר לכיוונית שצוינה ב-E.2; השני ישווה את הקטבים לאזור שבשולי הצד הקרוב במקום למשווה.

5. **חלקה של הגאות בציפוי.** הגוף המחובר נמתח לאורך הקו אל כדור הארץ, בנוסף לכך שנפחס על ידי הסיבוב שלו (C.3). ששת הכיפות נותנות עכשיו את הצורה כמספר (A.9, C.3); מה שנותר הוא לגזור את חלק הביצה שלה מן הכוחות. הצורה הגאותית של גוף המוחזק בבסיסו, וההרפיה שלה בזמן שהגוף עלה, יתנו את החלק הזה, ואולי יסבירו את היחס של המכתשים הגדולים ביותר (0.38 ± 1.84 , D.2). *מה זה יראה:* את חלק הביצה של הצורה כשהוא מחושב ולא נקרא, להשוואה עם A.9; אם המכתשים הגדולים ביותר, העומדים מעבר לצורת השיא, חייבים את השאר לגאות; ויחד עם זה, מה עשה הכתר של הצד הרחוק (E.2).

6. **הריווח.** D.2 מראה שהמכתשים שמרו על גודלם; הריווח של המכתשים הקוטביים ביחס לגודלם — מרחקים לשכן הקרוב ביותר לפי קוטר, מול החגורה המשוונית — ימדוד ישירות את ההתכווצות שביניהם. *מה זה יראה:* את הסגירה של הרווחים בין המכתשים כמרחק, מדד ישיר של ההתכווצות ולא מדד שנגזר מן הצפיפות.

7. **הסימנים של הקליפה.** פיזור קווי הרוחב של מבני קיצור מחוץ לימות, כתיעוד שהקליפה הנוקשה הייתה אמורה להשאיר (C.7). מבני קיצור הם רכסים ודחיקות במקומות שבהם פני שטח נדחסו; המודל מצפה שירוכזו לעבר הקטבים, שיהיו מעטים יותר לעבר המשווה, ושלא תהיה חגורת מבני מתיחה במשווה. *מה זה יראה:* אם הקליפה התקצרה יותר מכל בכיוון הקטבים ופחות בכיוון המשווה, כפי ש-C.7 דורש — מבחן של תמונת שתי השכבות שאינו תלוי במכתשים.

8. **הפתחים והמכתשים שלהם.** לימות שסביב 90° מזרח ו- 90° מערב (A.9): היסטוריית ההשלכה של כל פתח, המעופים של מאמר 6 ממנו, ותפוקת המכתשים מעל 20° ק"מ באזור הנחיתה, בהשוואה לצפיפות סביב הימות כפונקציה של המרחק מהם. *מה זה יראה:* אם החומר החוזר מן הפתחים הרבים יותר שסביב 90° מזרח, יחד עם החומר שפיגר אחרי הסיבוב ונחת בצד המאסף, יצר מספיק מכתשים כדי להסביר את העודף בצד המאסף של E.2 — החישוב שיהפוך את העודף הזה ממתאם לתוצאה.

9. **הכיפות הפנימיות ביותר.** בתוך 10° מכל קוטב הספירות קטנות (86 בצפון, 36 בדרום, D.4), ושתייהן שוות בתוך הרווחים שלהן. המכתשים הקוטביים של הדור הבא של הקטלוגים, מתחת ל- 20° ק"מ, ימדדו את

- הפרופיל בתוך 10° , היכן שהספירה הנוכחית אינה יכולה. *מה זה יראה*: כיצד הציפוף משתנה במעלות האחרונות סביב כל קוטב, היכן שההתכווצות אמורה להיות הגדולה ביותר והמדגם הנוכחי קטן מכדי להכריע.
10. **הלחיצה על הבסיס והביצה**. בתוך קו הקורוטציה הגוף היה לחוץ על הבסיס שלו בכ-3 ג'יגה-פסקל אלף קילומטר לפני הקו, ירידה לאפס על הקו (C.6); אחיזה של כ-1–4 ג'יגה-פסקל היא מה שהחזקת הצורה הפחוסה מחוץ לעיגול דורשת. המודל דורש שהלחיצה הזו החזיקה את חלק הביצה של הצורה ושאוּבדנה שחרר אותו. *מה זה יראה*: כיצד לחיצה על בסיס ברוחב 3,000 ק"מ מחזיקה גוף מתוח לאורך קו כדור הארץ, וכמה מהר חלק הביצה נרפה כשהלחיצה נעלמת.
11. **הקליפה מעבר לקו**. מן הקו ועד כ-20,100 ק"מ המתיחה שנשארת עולה על מה שגוף נוזלי של 2,600 ק"ג/מ"ק יכול לשאת, ועדיין פועלת לכיוון ביצה; הקליפה חייבת להתנגד לה, כפי שהיא מחזיקה את הצורה מכ-1.20 ל-1.04 לכל היותר בשחרור (C.1, C.6). *מה זה יראה*: את המאמץ בקליפה לאורך הקטע הזה, מול החוזק שלה.
12. **לאן הלכו פני השטח שנסגרו**. משיא של כ-1,700 ק"ג/מ"ק פני השטח הממוצעים יורדים ברבע ופני השטח הקוטביים בכמעט מחצית (מ-1,300 ק"ג/מ"ק המספרים היו 37%-ו-54%). קליפה ששמרה על הנפח שלה הייתה מתעבה בכשליש בסך הכול, ובערך פי 1.5 יותר בכיפות מאשר בחגורה (C.7). *מה זה יראה*: כיצד הקליפה קלטה את פני השטח שנסגרו בזמן שהקרום הקוטבי נשאר לא עבה מן החגורה, כפי ש-GRAIL מודד.
13. **קטלוג גדול יותר של מכתשים גדולים**. כל כיפה של 30° מכילה רק 13–68 מכתשים של 60–100 ק"מ, וצורת השיא הנקראת מהם רופפת (C.3). קטלוג של מכתשים של 60 ק"מ ומעלה עם פחות חסרים, או כיפות שנבחרות כך שיכילו יותר מהם, יקבע את חלק הביצה f ואת היחס a/c של השיא בדיוק רב יותר. *מה זה יראה*: את צורת השיא בטווח צר יותר, להעמיד מול צורת הסיבוב בצפיפות של C.1.
14. **מבחני הגודל לצורה התלת-צירית**. הגורמים הקווים של D.5 (0.79, 0.86, 0.90, 1.08) וח-0.79 שנובע מהם) והאליפטיות של D.5(d) חושבו על הצורה הפחוסה 1.69. *מה זה יראה*: את אותם חמישה מבחנים בקנה המידה של צורת השיא התלת-צירית, כ-1.8 : 1.4 : 1.

זמינות הקוד והנתונים

הספירות, השטחים של הכיפות ושל החגורות, הפתרונות של Maclaurin ושל Roche, גורמי ההרפיה, ההתאמה התלת-צירית לששת הכיפות, ירידת הנפח והמשיכה נטו של C.6 משוחזרים על ידי הסקריפטים של חבילת השחזור של LEF (Python 3, numpy, scipy), המופקדת עם הסדרה (רשומת Zenodo תוקצה בהמשך).

- Robbins, S. J. (2019). A new global database of lunar impact craters >1–2 km: 1. Crater locations [R1] and sizes, comparisons with published databases, and global analysis. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 124, 871–892. doi:10.1029/2018JE005592
- Chandrasekhar, S. (1969). *Ellipsoidal Figures of Equilibrium*. Yale University Press. (Maclaurin [R2] spheroids; Roche ellipsoids; the index symbols used in C.2.)
- Neumann, G. A., et al. (2015). Lunar impact basins revealed by Gravity Recovery and Interior [R3] Laboratory measurements. *Science Advances*, 1, e1500852. doi:10.1126/sciadv.1500852. (Table 1, basins of 500 km and more, used in A.3.)
- Losiak, A., et al.; revised by T. Öhman (2015). *Lunar Impact Crater Database*, v08Sep2015. [R4] Lunar and Planetary Institute. (Copernican-age craters used in D.3.)
- Nelson, D. M., et al. (2014). Mapping lunar maria extents and lobate scarps using LROC image [R5] products. *LPSC 45*, abstract 2861. (LROC global mare shapefile, used in A.3.)
- Mazrouei, S., Ghent, R. R., Bottke, W. F., Parker, A. H., & Gernon, T. M. (2019). Earth and Moon [R6] impact flux increased at the end of the Paleozoic. *Science*, 363, 253–257. (Second young-crater sample of D.3; the authors' input file on GitHub was used, not Table S1.)
- Grier, J. A., McEwen, A. S., Lucey, P. G., Milazzo, M., & Strom, R. G. (2001). Optical maturity of [R7] ejecta from large rayed lunar craters. *JGR*, 106, 32847–32862; as compiled in Tai Udovicic, C. J., et al. (2021), Zenodo 4345058. (Rayed craters, D.3.)
- Fortezzo, C. M., Spudis, P. D., & Harrel, S. L. (2020). Release of the digital Unified Global [R8] Geologic Map of the Moon at 1:5,000,000 scale. *LPSC 51*, abstract 2760. (Copernican units examined and not used, D.3.)
- Le Feuvre, M., & Wieczorek, M. A. (2008). Nonuniform cratering of the terrestrial planets. *Icarus*, [R9] 197, 291–306. (Pole-to-equator ratio about 0.90, D.1.)
- Le Feuvre, M., & Wieczorek, M. A. (2011). Nonuniform cratering of the Moon and a revised [R10] crater chronology of the inner Solar System. *Icarus*, 214, 1–20. (Pole-to-equator ratio about 0.80, D.1.)
- Gallant, J., Gladman, B., & Ćuk, M. (2009). Current bombardment of the Earth–Moon system: [R11] emphasis on cratering asymmetries. *Icarus*, 202, 371–382. (Pole-to-equator ratio 0.912, D.1.)
- Wang, Y., Wu, B., Xue, H., Li, X., & Ma, J. (2021). An improved global catalog of lunar impact [R12] craters (≥ 1 km) with 3D morphometric information and updates on global crater analysis. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 126, e2020JE006728. (Catalogue LU1319373; depth-to-diameter ratios, D.5.)
- Duran, Z., Papers 2 (*LEF Mechanism in Principle*), 3 (*LEF Mechanism in הסדרה: כתבי היד של* Practice), 6 (*The Craters*), 4 (*The Orbit*) and 11 (*The Requirements*) of the LEF series, deposited at .doi:10.5281/zenodo.22743615

הצהרות

מחבר: זוהר דוראן (Zohar Duran), חוקר עצמאי, רמלה, ישראל. ORCID 0009-0005-3194-9387. לא התקבל מימון ציבורי או מסחרי. קיימת בקשת פטנט זמנית בארצות הברית (מס' 64/116,844, הוגשה ב-22 ביולי 2026) למתקן הנדסי הקשור למודל.