

THE LEF MODEL · A SERIES OF TWELVE PAPERS

Lunar Elevation & Fission

1. המודל

הירח נבנה מכדור הארץ כשהוא מחובר אליו, ושחרר במקום שבו סיבוב כדור הארץ כבר נתן לו מהירות מסלול

חלקים A-F · התהליך בשלבים 0-8 · עשרת המאמרים · רמזור · דרישות

זהר דוראן

חוקר עצמאי, רמלה, ישראל

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

תרגום מלא לעברית של המאמר האנגלי · 15 באוקטובר 2026

המאמר הזה מציג את מודל LEF — Lunar Elevation and Fission, הרמה וביקוע של הירח — כתהליך אחד: הירח נבנה מכדור הארץ בזמן שהיה מחובר אליו, ושחרר במקום שבו הסיבוב של כדור הארץ כבר נתן לו את המהירות של מסלול חופשי. המאמר אינו מחשב דבר חדש. הוא מספר את התהליך כולו כסיפור רציף אחד, מציג כל אחד מעשרת המאמרים (2–11) שמחשבים את שלביו, ואוסף במקום אחד את מה שהסדרה מדדה ואת מה שהמודל דורש.

המודל הוא מודל תהליך, ולא הדמיה. הוא מציע רצף של אירועים פיזיקליים; לכל אירוע הסדרה מראה שהפיזיקה המקובלת מתירה אותו בתנאים שחושבו, נותנת את המספר שקובע אותו, ומציינת את התצפית שבוחנת אותו.

הסיפור מתנהל בשלבים 0–8. כדור ארץ חם שמסתובב מהר, פעם אחת בכל 5.5 שעות, והברזל שלו עדיין שוקע, מחזיק במקור לחץ של 150 ג'יגה-פסקל — די כדי להרים התכה מוקצפת, עשירה בחומרים נדיפים וקלה מ-3,864 ק"ג/מ"ק, עד קו הקורוטציה, המרחק שבו גוף שמסתובב עם כדור הארץ כבר נע במהירות של מסלול חופשי. הלחץ מרים בליטה אחת. על קצה הבליטה יושב גוף שמזון מבפנים בהתכה העמוקה ומכוסה מבחוץ בקליפה החיצונית של כדור הארץ, שעולה איתו כעור של כיפה: גוף פחוס מעל מגע של 6,000 ק"מ, שהכיפה העליונה שלו בגובה של כ-3,650 ק"מ, ובו מסת הירח בצפיפות של 1,300 ק"ג/מ"ק. חומר שנפלט מפתחים סביב האזור חוזר במהירות שבה יצא, 5 ק"מ/ש', ויוצר מכתשים על הקליפה הזאת בעוד היא עדיין מונחת על כדור הארץ. הבליטה נמשכת לאגס מחומרו של כדור הארץ עצמו, בערך תשע עד שתים-עשרה מסות ירח לפי רוחב בסיסו (מאמר 3); הוא חלק מכדור הארץ, מוחזק בכבידה של כדור הארץ כמו כל חלק אחר שלו, ואינו נזרק החוצה, משום שמהירותו אינה מהירות זריקה והוא נמצא בתוך קו הקורוטציה. בסיסו, ברוחב 9,000–11,000 ק"מ, עומד סמוך ל-Kiritimati במרכז האוקיינוס השקט, מעל ה-LLVP של האוקיינוס השקט (אזור איטי גדול במעטפת התחתונה), וקצהו מפגר מערבה. בזמן שהוא מחובר, הגוף עובר התעגלות החוצה, פחיסות — הקוטר המשווני שלו מגיע ל-1.69 פעמים הקוטר הקוטבי, ב-12,994 ק"מ — והתעגלות פנימה, שדוחסת את המכתשים של הקטבים שלו (יחס נקי של 1.20 ± 0.05 , שעולה עם גודל המכתש עד 1.53). כל עוד הגוף מחובר, החום שלו בא מכדור הארץ: הוא נכנס דרך Serenitatis ו-Imbrium, חוצה את הגוף ומרים מתחת לצד הרחוק את הכיפה שנעשית ל-South Pole Aitken. Serenitatis מתקלפת ראשונה; Imbrium נשארת מחוברת ומנותקת אחרונה. אחרי השחרור החום הוא חומו של הירח עצמו, ועמו קרינה מכדור הארץ הקרוב, שנחלשת ככל שהירח מתרחק, והירח מתקרר לאט — הימות תחילה, ומרכזו מאוחר יותר. האגס המתארך מאט את כדור הארץ, והליבה המתרכזת מאיצה אותו: בשחרור אורך היממה 5.77 שעות וקו הקורוטציה נמצא ב-16,399 ק"מ. הירח, עגול וקשיח, בצפיפות 2,600 ק"ג/מ"ק, מתחיל להיפרד כשמרכז המסה שלו מגיע אל הקו הזה, ונתלש מעט אחריו, כ-210 ק"מ מעבר לקו, לפני 3.873 מיליארד שנה. המערכת מחזיקה אז תנע זוויתי של פי 1.007 מזה של היום, כשהביקוע הקלאסי נזקק לפי 2.74. הירח נכנס למסלול שנטוי בזווית קו הרוחב שממנו יצא, 22.5° , והנטייה דועכת ל- 5.145° במרחק של היום, הערך הנצפה. השחרור אינו מפיל את האגס: ההתמיינות, שפועלת עליו בכל מקרה, אוספת אותו בחזרה אל תוך כדור הארץ במשך עשרות עד מאות מיליוני שנים. החלק הכבד שלו שוקע לבסיס המעטפת מתחת לבסיס האגס, הדופן הקדמית שלו מתקפלת אל הפסים של צפון האוקיינוס השקט, והחלק האחורי שלו נאסף אל הקשתות של מערב האוקיינוס השקט.

אותו רעיון, כשעוקבים אחריו על מאדים בדרך אחרת, נותן את שני הירחים הקטנים שלו. המאמר נחתם ברמזור של הסדרה — התצפיות שנבדקו —, בשמונה-עשרה הדרישות של מאמר 11 (The Requirements) עם המבחנים שלהן, בשתי תצפיות המפתח של המודל עם תוצאותיהן (הגאומטריה של

הירח נבנה מכדור הארץ, בזמן שהיה מחובר אליו, ושחרר במקום שבו הסיבוב של כדור הארץ כבר נתן לו את המהירות של מסלול חופשי. זה המודל כולו, והוא תהליך: כדור ארץ חם שמסתובב מהר, והברזל שלו עדיין שוקע, מרכז לחץ מתחת לאזור אחד; הלחץ מרים בליטה אחת, שנמשכת לאגס; על קצה האגס יושב גוף שגדל מבפנים ומבחוץ בעת ובעונה אחת; הגוף עובר התעגלות, פחיסות והתעגלות נוספת בזמן שהוא מחובר; וכשמרכז המסה שלו מגיע לקו הקורוטציה הוא מתחיל להיפרד, ומעט אחריו, כ-210 ק"מ מעבר לקו, הוא נתלש — עגול — אל המסלול. האגס נאסף אחר כך בחזרה אל כדור הארץ ומשאיר בו את הקפלים שלו.

חמישה מספרים נושאים את המודל. כל אחד מהם מחושב בסדרה.

- **השחרור.** קו הקורוטציה בשחרור נמצא ב-**16,399 ק"מ**, ביממה של **5.77 שעות** — כ-2.6 רדיוסי כדור הארץ (מאמר 2, LEF Mechanism in Principle).
- **התקציב.** המערכת בשחרור מחזיקה תנע זוויתי של פי **1.007** מזה של היום; הדרך הקלאסית נזקקת לפי **2.74** (מאמר 2).
- **הדחיפה.** הלחץ במקור הוא **150 ג'יגה-פסקל**; הרמת התכה בצפיפות 3,500 ק"ג/מ"ק עד הקו עולה 139.78 ג'יגה-פסקל ומשאירה 10.49 (מאמר 3, LEF Mechanism in Practice).
- **הצפיפות.** לגוף שעל קצה האגס צפיפות של **1,300 ק"ג/מ"ק**, בשחרור **2,600**, והיום **3,344** (מאמר 3).
- **הגיל.** הניתוק התרחש לפני **3.873 מיליארד שנה**, הגיל שבו אופסו השעונים של הנוריתים של South Pole-Aitken (מאמר 8, South Pole-Aitken).

מה המודל דורש. גוף אם שעדיין כמעט אחיד בפנימו כשהעברה מתחילה (מקדם מומנט התמד $k \gtrsim 0.397$); התכה עמוקה קלה מ-3,864 ק"ג/מ"ק — קצף עשיר בחומרים נדיפים הוא כזה, והתכה יבשה אינה כזאת; קליפה קשיחה מספיק כדי לשמור על המכתשים שלה ($10^{23} \gtrsim$ פסקל-שנייה); אגס, שמוחזק כמו כל חלק של כדור הארץ בכבידה של כדור הארץ, נשאר בתוך קו הקורוטציה ונושא את הגוף עד אליו; וירח עגול וקשיח בשחרור (יחס צירים ≤ 1.04). כל דרישה מוצגת עם המבחן שלה במאמר 11 ונאספת בחלק E.

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

מבוא — תשובה מסוג אחר

מוצאו של הירח מוצג בדרך כלל כשאלה סגורה: גוף בגודל מאדים פגע בכדור הארץ הצעיר, והירח הצטבר מן הפסולת. המודל הזה הסביר הרבה ונתמך בחישובים נרחבים. אבל כל אחת מן התכונות המיוחדות ביותר של הירח חייבה אותו להוסיף דבר מה. החומר של הירח זהה מבחינה איזוטופית לחומר של כדור הארץ, ולכן הפגיעה חייבת הייתה לערבב את שני הגופים לחלוטין [2, 3]. מסלול הירח נטוי בחמש מעלות מן המישור שבו דיסקת פסולת הייתה משאירה אותו, ולכן תהודה, גוף פלנטימלי חולף או כדור ארץ שנטה ביותר משבעים מעלות חייבים היו להטות אותו אחר כך [4, 5]. הקרום בצד הרחוק עבה יותר מאשר בצד הקרוב, ולכן ירח שני חייב היה ליפול עליו [6]. אלה אינם כישלונות. הם המחיר של מודל שבו הירח מורכב משברים בחלל.

המודל שמוצג כאן אינו משלם אף אחד מן המחירים האלה, משום שבו הירח אינו מורכב משברים. הוא מורם, כגוף מחובר אחד, מתוך כדור הארץ, ומשתחרר. לחומר שלו ההרכב של כדור הארץ, משום שהוא בא מכדור הארץ. המסלול שלו נטוי, משום שהוא יצא מקו רוחב ולא מדיסקה משוונית. הצד הרחוק שלו עבה, משום שהוא בנוי משכבות רבות של סיאל דחוס, שכוחות הסיבוב נשאו אל קצה הבליטה, ומחומר שחזר אליו שוב ושוב; הצד הקרוב היה הבסיס. מה שהמודל צריך לשלם במקום זאת הוא ההרמה, והמחיר הזה מחושב: הלחץ, התנע הזוויתי, החיבור והשחרור.

זהו מודל תהליך, ויש להגדיר את המונח לפני שמציגים את המודל. הדמיה פותרת את משוואות התנועה עבור מצב התחלתי שנבחר, ומדווחת מה קורה. מודל תהליך יוצא מרצף מוצע של אירועים. לכל שלב הוא מראה שהפיזיקה מתירה את האירוע, נותן את המספר שקובע אותו, בודק שהמספרים מתיישבים זה עם זה, ומציין תצפית מסוימת שבוחנת אותו. השערת הפגיעה הענקית הייתה מודל תהליך במשך שנים רבות לפני שהורצו ההדמיות הראשונות [7]. המודל הנוכחי נמצא בשלב הזה, והסדרה כתובה כך שאפשר יהיה לבחון אותו. אף שלב אינו מבקש מן הקורא לקבל אותו בלי המספר שלו.

איך המאמר בנוי. הוא מספר קודם את הסיפור ומציג אחר כך את המאמרים. חלק A מציג את מה שכל מודל של מוצא הירח חייב להסביר, ומדוע דרך ההרמה הייתה סגורה במשך מאה שנה. חלק B מספר את התהליך בשלבים 0–8 כתיאור רציף אחד, עם המספר המרכזי של כל שלב והמאמר שמחשב אותו. חלק C מציג את עשרת המאמרים שמחשבים את המודל, בזה אחר זה: הטענה של כל אחד, ואחריה כל אחד מחלקיו בפסקה. חלק D אוסף את הרמזור של הסדרה — כל תצפית שנבדקה, בירוק, בכתום או כמבוטלת. חלק E אוסף את הדרישות ומציג את שתי תצפיות המפתח של המודל עם תוצאותיהן. חלק F מונה את שנים-עשר המאמרים ואת מה שנותר פתוח.

חלק	כותרת	השאלה שהוא מכריע
A	מה צריך להסביר	אילו תכונות חייב כל מודל של מוצא להסביר, ומדוע ההרמה נחשבה בלתי אפשרית?
B	התהליך, בשלבים 0–8	מה קרה, באיזה סדר, ובאיזה מספר בכל שלב?
C	המאמרים, בזה אחר זה	מה טוען כל אחד ממאמרים 2–11, ומה מבסס כל אחד מחלקיו?
D	הרמזור של הסדרה	מה נמדד, ואיך יצא כל מבחן?
E	הדרישות ותצפיות המפתח	מה חייב להתקיים אם המודל נכון, ומה העלו שתי תצפיות המפתח שלו?

הערה

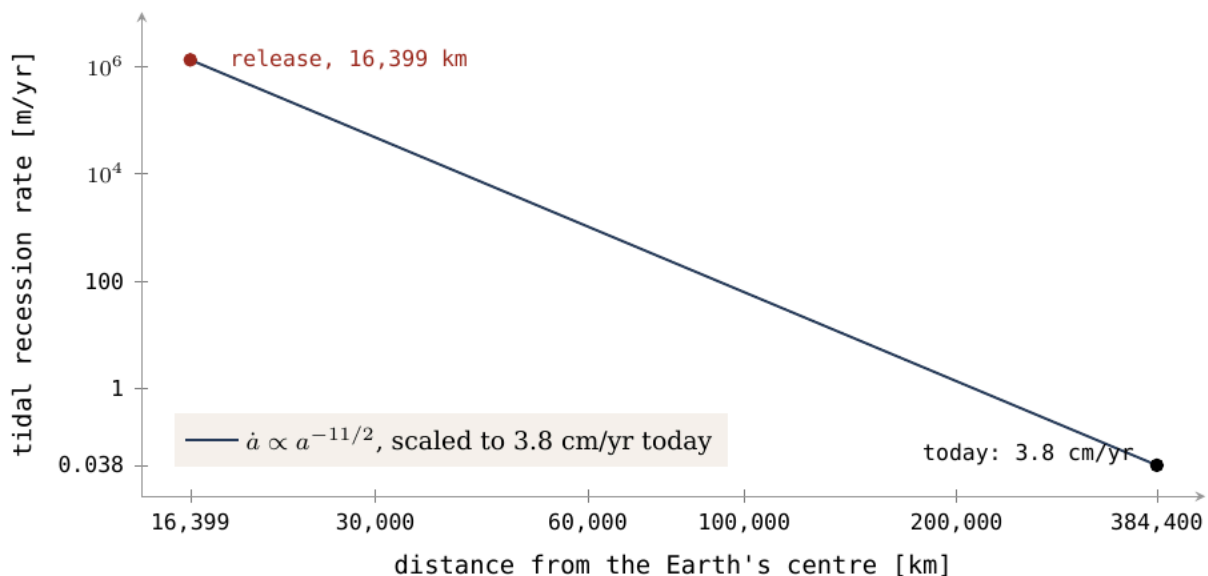
התהליך התרחש על כדור ארץ שאינו קיים עוד, והמודל מנוסח בסביבה ההיא, ולא בסביבה של היום. לפני כ-4.5 מיליארד שנה כדור הארץ היה כבד יותר במסה של ירח אחד — מסתו, 6.0455×10^{24} ק"ג, היא כדור הארץ של היום והירח של היום בגוף אחד. הוא היה חם כולו והתפשט מחמת החום, ברדיוס נפחי של 6,517 ק"מ (כ-6,721 ק"מ בקו המשווה, משום שגוף שמסתובב מהר מתנפח שם). הוא הסתובב פעם אחת בכל 5.5 שעות. הברזל שלו עדיין שקע; התארגנות הליבה רק החלה, כשלב הראשון של תהליך אחד ארוך ורציף. אטמוספרת קיטור של מאות בָּרים כיסתה פני שטח מותכים, ועור סיאלי קר וקשיח צף עליהם.

כל מספר במאמרים שלהלן מחושב בתנאים האלה. התנאים של כדור הארץ של היום — קרום מוצק, יממה איטית, אוקיינוסים, ירח שמתרחק בסנטימטרים בשנה — אינם חלים עליו, בדרך כלל בהפרש של סדרי גודל. הטבלה שלהלן פורשת את הסביבה תחום אחר תחום.

תחום	הסביבה של התהליך	מדוע היא חשובה למודל
השמש	חלשה בכ-30% מהיום, אבל פעילה בהרבה ברוח השמש ובקרניה העל-סגולה [1]	פני שטח מתקררים מהר יותר; חומרים נדיפים בורחים לחלל באובדן הידרודינמי; השמיים אינם מקור חום
מסת כדור הארץ	6.0455×10^{24} ק"ג — כדור הארץ של היום (5.972×10^{24}) והירח של היום (7.35×10^{22}) יחד, בגוף אחד	החומר של הירח נמצא בתוך גוף האם; דבר עוד לא עזב
הגודל	רדיוס נפחי 6,517 ק"מ, כולל התפשטות תרמית של 120 ק"מ; על ספרואיד שנפחם בגלל הסיבוב, רדיוס משווני 6,721 ק"מ ורדיוס קוטבי 6,128 ק"מ (מאמר 2)	ההתפשטות היא דרישה: בהתפשטות של פחות מ-98 ק"מ התקציב אינו נסגר (מאמר 2)
היממה	5.5 שעות בהתחלה; 5.77 שעות בשחרור, משום שהאגס המתארך מאט את הסיבוב והברזל ששוקע אל המרכז מאיץ אותו (מאמר 2). המהירות בקו המשווה בהתחלה היא כ-2.1 ק"מ/ש', והשמיים מסתובבים מהר פי ארבעה מהיום	קו הקורטוציה נמצא ב-15,818 ק"מ בהתחלה (5,020 מ'/'ש') וב-16,399 ק"מ בשחרור — רק כ-2.5–2.6 רדיוסי כדור הארץ מן המרכז, כשהיום הוא נמצא במרחק של הלזיוניים הגאוסטציונריים
כבידה	כ-8.25 מ'/'ש ² בקו המשווה ו-9.5 בקו רוחב 44°, על גוף האם הפחוס והמסתובב	הכבידה אינה מספר אחד; היא משתנה עם קו הרוחב, עם המסה שעוזבת ועם הגוף שעולה מעל פני השטח
הפנים	חם כולו; הברזל שוקע, והליבה רק מתחילה להתארגן ($k \approx 0.4$); אוקיינוס מאגמה מתחת לעור דק שהתקרר	התנע הזוויתי אגור כמו בגוף כמעט אחיד; הפנים יכול לזרום; לחץ של 150 ג'יגה-פסקל זמין במקור (מאמר 3)

מים	אין מים נוזליים. האוקיינוסים של היום הם אטמוספירת קיטור של מאות גרים מעל פני שטח מותכים; החומרים הנדיפים מומסים בהתכה, ושופעים בהרבה מהיום	החומרים הנדיפים מורידים את צפיפות ההתכה העולה לכ-1,300 ק"ג/מ"ק בגוף שעל הקצה; הם אינם מעלים את הלחץ מעל הערך הליתוסטטי; אין אוקיינוס שימלא אגן
הקליפה החיצונית	עור סיאלי קר וקשיח, בצפיפות 2,800 ק"ג/מ"ק, מעל בסיס נייד — הדבר הקשיח היחיד במערכת, והדבר היחיד שיכול לשמור על מכתש	הסיאל שלה, שנישא אל קצה האגס ונאסף שם בשכבות רבות, נעשה לקרום של הצד הרחוק של הירח ונושא את הרשומה המוקדמת ביותר שלו; היא חייבת להיות קשיחה יותר מ-10^{23} פסקל שנייה כדי לשמור על המכתשים שלה (מאמר 3)
המקום	בסיס האגס סמוך ל-Kiritimati (כ-1.9° צפון, 157.5° מערב, במרכז האוקיינוס השקט), מעל ה-LLVP של האוקיינוס השקט בתחתית המעטפת; האגס נטה לאחור מערבה וצפונה מעל צפון-מרכז האוקיינוס השקט (הקריאה המוקדמת של המקור, כ-25° צפון, 165° מזרח) (מאמרים 3, 9)	כל מיקום ניתן במערכת הייחוס של היום (ראו את התיבה על הצירים להלן)
זמן	התחלה לפני כ-4.5 מיליארד שנה; בציר הזמן הגס של הסדרה כ-600 מיליון שנה מתחילת הבליטה ועד השחרור לפני 3.873 מיליארד שנה; כ-400 מיליון שנה לבליטה ולאגס, כ-100 מיליון שנה של פחיסות, וכ-100 מיליון שנה עד השחרור (מאמרים 2, 8, 11)	תרחיש עבודה, ולא משך שנמדד; כמה זמן "הירח" היה מחובר תלוי במה שקוראים לו ירח (חלק B)
קצבים	הקצבים אינם הקצבים של היום. קצב ההתרחקות הגאותית של הירח יורד בכשבעה סדרי גודל מן השחרור ועד היום, שבו הוא 3.8 ס"מ בשנה; גוף ששוחרר מעט בתוך קו הקורוטציה נופל פנימה במשך מיליארדי שנים ואז מתפרק בתוך עשרות מיליוני שנים (מאמרים 4, 10)	תהליכים שנמשכים היום מיליארדי שנים נמשכו אז אלפי שנים; סדר האירועים נקבע בידי קצבים שירדו ככל שהירח התרחק

התמונה שהטבלה נותנת היא של כוכב לכת שמסתובב בחמש וחצי שעות מתחת לאטמוספירת קיטור, זוהר בפני השטח שלו, עם עור קר שצף עליו, ובלי ירח. איור 1 מראה את הנקודה בעניין הקצבים: התרחקות גאותית של סנטימטרים ספורים בשנה היום הייתה, קרוב לכדור הארץ, התרחקות מסוג אחר לגמרי. התהליך שבא להלן הוא האופן שבו הירח יצא מכוכב הלכת הזה.



1. איור. הקצבים של היום אינם חלים על כדור הארץ המוקדם. קצב ההתרחקות הגאותית, שמשורטט עבור פיזור אנרגיה קבוע ומכיל ל-3.8 ס"מ בשנה של היום, יורד בכשבעה סדרי גודל בין קו השחרור לבין המרחק של היום. העקומה מראה סדר גודל בלבד: פיזור קבוע אחד אינו יכול להתאים גם לקצב של היום וגם לגיל המערכת (מאמר 4 (The Orbit), (D.3§). [בתרשים: ציר אופקי — מרחק ממרכז כדור הארץ, בק"מ; ציר אנכי — קצב ההתרחקות הגאותית, במטרים לשנה; העקומה $\dot{a} \propto a^{-11/2}$ מכילת ל-3.8 ס"מ בשנה היום; נקודה אדומה — השחרור, 16,399 ק"מ; נקודה שחורה — היום: 3.8 ס"מ בשנה.]

מה לא נפתר — הצירים

מערכת הצירים של כדור הארץ ושל הירח, מן השחרור ועד היום, אינה נפתרת בסדרה הזאת. זו בעיה בפני עצמה. מעורבים בה ארבעה מישורים — קו המשווה של כדור הארץ, מסלול הירח, קו המשווה של הירח ומישור המילקה. הצירים נעים בשתי דרכים שונות — בנדידה איטית של הגוף ביחס לציר הסיבוב שלו, ובנקיפה של ציר הסיבוב בחלל — בקצבים שנבדלים זה מזה בסדרי גודל. הבליטה הקפואה של כדור הארץ שומרת זיכרון לא ידוע של סיבובים קודמים, והחלקים משפיעים זה על זה במשוב הדדי.

לכן הסדרה נותנת כל מיקום במערכת הייחוס של היום: בסיס האגס סמוך ל-Kiritimati, הפסים של צפון האוקיינוס השקט, היציאות מתחת ל-South Pole-Aitken. במקום שבו כיוון בעבר חשוב — 22.5° של השחרור, קו המשווה של הפסים שנטוי ב- 10° לפחות לקו המשווה של היום — המאמר שמשתמש בו אומר זאת. הצירים הם עבודה עתידית, ולא מאמר בסדרה (חלק F); פתרונם עשוי לשנות חלקים מן המודל, והמודל מנוסח בצורה שמאפשרת זאת.

חלק A — מה צריך להסביר

הבעיה והגישה

הבעיה: אילו תכונות של הירח חייב כל מודל של מוצאו להסביר, אילו מהן עלו לתמונת ההרכבה-משברים בתוספות שלה, ומדוע דרך ההרמה נסגרה? **הגישה:** למנות את שבע התכונות שמאמר 11 הופך לדרישות, להציב את התוספות של מודל ההתנגשות לצד מה שירח מורם מקבל מן הגאומטריה שלו, ולבחון מחדש את ההתנגדות מצד התנע הזוויתי במקום שבו הדרך הזאת באמת משחררת את הירח.

חלק A קובע את המטרה. לפני שהתהליך מסופר בחלק B, הקורא צריך לדעת מה עליו לספק: רשימה של תכונות שיש לירח, כל אחת מהן נמדדה, וכל אחת מהן מודל של מוצא חייב ליצור. הרשימה קצרה, וכל פריט בה נבחן שוב, עם המבחן שלו, במאמר 11.

A.1 שבע התכונות של הירח

הירח עשוי מחומרו של כדור הארץ: איזוטופי החמצן, הטיטניום, הכרום והטונגסטן שלו אינם ניתנים להבחנה מאלה של כדור הארץ, בתוך כמה חלקים למיליון [2, 8]. איזוטופים הם צורות של יסוד אחד שנבדלות זו מזו רק במסה; היחסים ביניהם משתנים מגוף אחד במערכת השמש לאחר, וקשה לשנות אותם אחרי שגוף נוצר, ולכן הם משמשים תווית של מוצא. בחמצן ההפרש בין כדור הארץ לירח הוא 1 ± 5 ppm (חלקים למיליון). לירח ליבה מתכתית קטנה: הרדיוס הסייסמי שלה כ-330 ק"מ, כ-1.4% ממסת הירח [9], לעומת 32% בכדור הארץ. הקרום שלו עבה יותר בצד הרחוק מאשר בצד הקרוב [10] — בכ-10 ק"מ בין מרכז הצד הקרוב לבין הצד הרחוק, ובכ-8 ק"מ בממוצעים של חצאי הכדור. הוא מפנה פנים אחד אל כדור הארץ. פני השטח של הצד הרחוק שלו נסגרו ונשמרו לפני שהצד הקרוב, המוזן, נרגע, והצד הרחוק עתיק מן הימות של הצד הקרוב. ההתכה המוקדמת שלו נשאה מים: תכלילי התכה — טיפות זעירות של מאגמה שנאטמו בתוך גבישים בזמן היווצרותם — מכילים 1,410–615 ppm [11]; החומרים הנדיפים התאדו מאז לחלל, והפנים שנמדד היום יבש. ומרכז המסה שלו נמצא כ-2 ק"מ לכיוון כדור הארץ ממרכז הצורה שלו.

מאמר 11 הופך את שבע התכונות האלה לשבע דרישות, R1–R7, כל אחת עם הגודל שבודק אותה. טבלה A.1 מונה אותן. לשבע מתווספת כאן תכונה אחת נוספת, משום שהיא התכונה שדיסקת פסולת אינה יכולה לתת בלי עזרה: מסלול הירח נטוי ב- 5.145° למישור המילקה.

מה נמדד	מה ירח מורם חייב להראות	תכונה
R1	החומר של כדור הארץ	$\Delta^{17}\text{O} = -1 \pm 5$ ppm; איזוטופי W, Cr, Ti תואמים את אלה של כדור הארץ
	הרכב שאפשר להגיע אליו כתערובת של שני המקורות הארציים, ההזנה העמוקה והקליפה העולה	

R2	ליבה קטנה	ליבה סייסמית ברדיוס של כ-330 ק"מ, כ-1.4% מן המסה	מעט מתכת הגיעה לירח: ההזנה הייתה בעיקר סיליקט עם מעט מתכת ארצית, כ-1.47% מן החומר העמוק אם סופרים רק את המתכת שהגיעה לליבה; רוב חומרי הליבה חזרו במורד האגס אל כדור הארץ
R3	צד רחוק עבה יותר	GRAIL: הצד הרחוק עבה יותר בכ-8–10 ק"מ	שכבות רבות של סיל דחוס שנדד אל הקצה, ושל חומר חוזר, על חצי הכדור הרחוק
R4	פנים אחד אל כדור הארץ	סיבוב סינכרוני	הצד שבו הירח היה מחובר הוא הצד שפונה אל כדור הארץ
R5	סדר של שימור	הצד הרחוק עתיק מן הימות של הצד הקרוב	הצד הרחוק נסגר ושמר את הרשומה שלו לפני שהצד המזון נרגע
R6	מים	1,410–615 ppm בתכלילי התכה	חומרים נדיפים בכמות מספקת, ובמצב הנכון, כדי להקציף את ההזנה
R7	מרכז המסה	כ-2 ק"מ לכיוון הצד הקרוב	קרום בצורה שמודלה נותן 3.11–1.24 ק"מ עבור ניגודי צפיפות של 750–300 ק"ג/מ"ק
+	נטיית המסלול	5.145° למישור המילקה	מסלול שנטיי בזווית קו הרוחב שממנו יצא (מאמר 4)

איך לקרוא את הטבלה. כל שורה מחברת תכונה שנמדדה לשלב בדרך: R1 למקור, R2 להזנה, R3 ו-R7 לבניית הקרום של הצד הרחוק ולצורת הקרום, R4 לחיבור, R5 לסדר שבו נשמרו שני הצדדים, R6 לתנאים שההזנה נזקקה להם. מאמר 11 אינו סופר את אלה כשבע הוכחות: הצד הרחוק העבה, מרכז המסה המוסט ומיקום הימות הם פיזור אחד של חומר שנראה בכמה דרכים, ולספור אותם בנפרד פירושו לספור עובדה אחת כמה פעמים. מאמר 11 מוסיף אחת-עשרה דרישות נוספות, R8–R18, שנובעות מן האגס ומן המאמרים המאוחרים; חלק E מונה את כל שמונה-עשרה.

A.2 מה מודל ההתנגשות היה צריך להוסיף

הטבלה שלהלן מציבה את מודל ההתנגשות ואת הירח המורם זה לצד זה, תכונה אחר תכונה. העמודה האמצעית היא מה שמשפחת מודלי הפגיעה הענקית חייבת להוסיף כדי לקבל כל תכונה; העמודה השמאלית היא מה שירח שהורם מכדור הארץ מקבל מן הגאומטריה של הדרך.

תכונה	מה משפחת מודלי הפגיעה הענקית חייבת להוסיף	מה ירח מורם מקבל
-------	---	------------------

חומר זהה לחומר של כדור הארץ	ערבוב מלא של הגוף הפוגע ושל כדור הארץ: סינסטיה או התנגשות אנרגטית מאוד [2, 3]	החומר הוא של כדור הארץ; אין צורך בערבוב (מאמרים 3, 11)
מסלול נטוי ב-5°	עירור מאוחר: תהודת אבקציה, מפגשים עם גופים פלנטזימליים, או נטייה התחלתית גבוהה של ציר כדור הארץ [4, 5]	הנטייה היא קו הרוחב של השחרור, $\lambda = i: 22.5^\circ$ בשחרור, 5.145° במרחק של היום לפי חוק הדעיכה המצומצם, הערך הנצפה (מאמר 4)
קרום עבה יותר בצד הרחוק	ירח שני, מלווה, שמצטבר על הצד הרחוק [6]	הצד הרחוק הוא שכבות רבות של סיאל דחוס, שכוחות הסיבוב נשאו אל קצה הבליטה, ושל חומר שחזר שוב ושוב; הצד הקרוב היה הבסיס (מאמר 3)
ליבה קטנה	הליבה של הגוף הפוגע שוקעת לתוך כדור הארץ, וחלק קטן נשמר	כל המתכת של הירח ארצית. הרבה ברזל נכנס לאגס, פחות לכיוון קצהו, וההזנה שהגיעה לירח הייתה בעיקר סיליקט עם מעט מתכת; ברגע הניתוק חומר הליבה הכבד היה בשליש האחרון של הגוף, לא עבר את קו הקורוטציה וחזר במורד האגס אל כדור הארץ (מאמרים 3, 11)
מים בפנים המוקדם	הבאה בידי הגוף הפוגע או בהצטברות מאוחרת, אחרי שחום הפגיעה גירש את החומרים הנדיפים	ההתכה הייתה עשירה בחומרים נדיפים; החומרים הנדיפים הם שעשו אותה קלה מספיק כדי לעלות (מאמר 3)
תנע זוויתי	נקבע בגאומטריית הפגיעה, ואחר כך מופחת בתהודת אבקציה [4]	פי 1.007 מזה של היום בשחרור, עבור גוף אם שהתחיל ב-5.5 שעות (מאמר 2)

הטבלה היא טיעון של חסכנות. במודל ההתנגשות לכל תכונה יש סיבה משלה, שנוספה בשבילה: ערבוב מלא בשביל האיזוטופים, תהודה או מפגש בשביל הנטייה, ירח שני בשביל הצד הרחוק, אובדן של חומרים נדיפים ואחריו החזרה של מים. במודל ההרמה אותן תכונות באות מסיבה אחת — הדרך שבה החומר יצא — והמודל משלם במקום זאת על ההרמה. שאר הסדרה מחשבת מה ההרמה דורשת.

A.3 מדוע ההרמה נחשבה בלתי אפשרית

ההתנגדות. הביקוע — הרעיון שכדור ארץ שמסתובב מהר השיל את הירח — הוצע בידי Darwin ב-1879 ונדחה בתוך עשורים ספורים [12]. הסיבה הייתה חשבונית: ירח שנזרק מפני השטח של כדור הארץ היה דורש שכדור הארץ יסתובב כל כך מהר, שמערכת כדור הארץ-ירח הייתה צריכה להחזיק בערך פי ארבעה מן התנע הזוויתי שהיא מחזיקה היום. תנע זוויתי הוא כמות הסיבוב הכוללת של מערכת — הסיבוב של כדור הארץ סביב צירו ועוד התנועה של הירח סביבו. הוא נשאר קבוע אלא אם משהו מחוץ למערכת מפעיל עליה פיתול, ומכיוון ששום דבר מבחוץ לא הוסיף ממנו, לעודף לא היה לאן ללכת. החשבון נכון. מאמר 2 מראה מה הוא מניח: שהחומר יוצא מפני השטח, במהירות של פני השטח.

מדוע פני השטח נכשלים. על פני השטח של גוף אם שמסתובב פעם אחת בכל 5.5 שעות, הסיבוב נושא את החומר במהירות של כ-2,133 מ"ש; מסלול חופשי בגובה הזה דורש כ-7,701 מ"ש. לחומר ששוחרר שם חסרים כ-5.6 ק"מ/ש עד מהירות מסלולית, והוא נופל חזרה. הדרך היחידה לסגור את הפער על פני השטח היא לסובב

את כדור הארץ כולו מהר יותר, וסיבוב מהיר יותר עולה בתנע זוויתי. בנקודה הקלאסית שבה גוף נוזלי מסתובב נעשה לא יציב — התפצלות Jacobi — גוף האם מסתובב פעם אחת בכל 2.73 שעות ומחזיק כ- 9.42×10^{34} ק"ג·מ²·ש⁻¹, פי 2.74 ממה שמערכת כדור הארץ-ירח מחזיקה היום. הערך של בערך פי ארבעה (4.08) בא מחישוב הייחוס המקורי, שנעשה בנקודה אחרת של אותו רצף של צורות מסתובבות; ממנו בא הניסוח המוכר.

מדוע קו הקורוטציה מצליח. דרך LEF סוגרת את הפער בדרך אחרת: לא בסיבוב מהיר יותר של כדור הארץ, אלא בנשיאת החומר החוצה בזמן שהוא עדיין מסתובב עם כדור הארץ. גוף שמסתובב עם כדור הארץ משלים סיבוב אחד בכל יממה של כדור הארץ, ולכן ככל שהוא רחוק יותר הוא נע מהר יותר; המהירות שמסלול מעגלי חופשי דורש יורדת עם המרחק. שתי המהירויות נפגשות במרחק אחד, *רדיוס הקורוטציה* — המרחק שבו גוף שמסתובב עם כדור הארץ כבר נע במהירות של מסלול חופשי:

$$v_{\text{rot}} = \Omega r, \quad v_{\text{orb}} = \sqrt{\frac{GM}{r}}, \quad \Omega r_c = \sqrt{\frac{GM}{r_c}} \Rightarrow r_c = \left(\frac{GM}{\Omega^2} \right)^{1/3}.$$

כאן Ω הוא קצב הסיבוב של כדור הארץ (2π חלקי אורך היממה), G קבוע הכבידה ו- M מסת כדור הארץ.⁽¹⁾ במילים: רדיוס הקורוטציה הוא המרחק היחיד שבו מסלול מעגלי נמשך בדיוק כמו סיבוב אחד של כדור הארץ. ביממה של 5.5 שעות הוא נמצא ב-15,818 ק"מ, ושתי המהירויות שם הן 5,020 מ"ש; ערך זה לוקח בתור M את מסת כדור הארץ לבדה, כמו לחלקיק בוחן, ואילו עם המסה המלאה של גוף האם, 6.0455×10^{24} ק"ג, אותה נוסחה נותנת 15,883 ק"מ (מאמר 3, A.9§) — שתי הגדרות, ושתיהן משמשות בסדרה. הלוויינים הגאוסטצינוריים של היום יושבים על אותו קו, עבור היממה של היום; ביממה של שעות ספורות הקו היה רק כשניים וחצי רדיוסי כדור הארץ מן המרכז. מסה ששחררה שם כבר נמצאת במסלול. תמונה יומיומית: ילד שהולך ממרכז קרוסלה מסתובבת אל שפתה נע מהר יותר בשפה, בלי שמישהו דוחף את הקרוסלה חזק יותר. הגוף עלה באותה דרך — צבר מהירות בהדרגה לאורך הטיפוס, ולא בזריקה אחת. Darwin חישב מה נדרש כדי לזרוק ירח מפני השטח; דרך LEF מגדלת ירח ונושאת אותו החוצה.

התקציב בקו. הסיבוב שכדור הארץ צריך לשם כך הוא הסיבוב שהיה לו אילו כל התנע הזוויתי של היום הוחזר אליו: כ-5.5 שעות. גוף אם אחיד ברדיוס נפחי 6,517 ק"מ, שנפחס בגלל הסיבוב לרדיוס משווני של 6,721 ק"מ ומסתובב ב-5.5 שעות, מחזיק 3.466×10^{34} ק"ג·מ²·ש⁻¹. במהלך ההעברה האגס המתארך מאט את כדור הארץ והברזל ששוקע אל המרכז מאיץ אותו; בשחרור אורך היממה 5.77 שעות, וקו הקורוטציה, כשמסת הירח עצמה נכללת בחשבון, נמצא ב-16,399 ק"מ. שם מחזיק מסלול הירח 5.9×10^{33} (17% מן התקציב; זהו התנע הזוויתי המסלולי של הזוג סביב מרכזם המשותף, עם המסה המצומצמת — כשסופרים את מלוא מסת הירח סביב מרכז כדור הארץ מתקבל 6.0×10^{33}) והסיבוב של כדור הארץ 2.88×10^{34} ; המערכת מחזיקה פי **1.007** מן התנע הזוויתי של היום (3.466 מול 3.441×10^{34}), אותו סך שהחזיקה בהתחלה. לעודף, 0.7% בסכום הסקלרי ו-1.5%–2.5% מול הסכום הווקטורי בזוויות שנבדקו, יש הסימן הנדרש: מאז השחרור, הגאות של השמש הוציאה כ-1% מן התנע הזוויתי של המערכת. טבלה A.3 מציבה את הדרכים זו לצד זו.

דרך	היכן נעשית התאמת המהירויות	יממת כדור הארץ	תנע זוויתי / של היום
ביקוע קלאסי, נקודת הייחוס המקורית	פני השטח	—	בערך 4 (4.08)
ביקוע קלאסי, התפצלות Jacobi	פני השטח	שעות 2.73	2.74
LEF, התקציב הנשמר	קו הקורוטציה: 15,818 ק"מ בהתחלה, 16,399 ק"מ בשחרור	שעות 5.5 → 5.77	1.007

טבלה A.3. המחיר בתנע זוויתי של אותו מוצר — ירח במסלול — לפי הדרך. האדום דוהה ככל שהמחיר יורד: הדרך הקלאסית בוחנת את תנאי המהירות על פני השטח ומשלמת פי שניים עד פי ארבעה מן התקציב של היום; דרך LEF בוחנת אותו בקו הקורטוציה ומשלמת את מה שהמערכת מחזיקה (מאמר 2, A.6§).

איך לקרוא את הטבלה. השורות עוברות מן הדרך היקרה ביותר אל הזולה ביותר, והצבע דוהה עם המחיר. שתי השורות האדומות דורשות מפני השטח של כדור הארץ להגיע למהירות מסלולית, וזה דוחף את גוף האם לקראת התפרקות. השורה האחרונה אינה משתמשת בתנאי הזה כלל: החומר נישא החוצה בקורטוציה, והתאמת המהירויות נעשית בקו, שבו גוף אם שמסתובב פעם אחת בכל 5.5 שעות כבר מספק מהירות מסלולית. במהלך ההעברה האגס והליבה משנים את אורך היממה ומזיזים את הקו, אבל הם רק מעבירים תנע זוויתי בין הסיבוב של כדור הארץ לבין מסלול הירח; הסך זהה בהתחלה ובשחרור, פי 1.007 מזה של היום (גרסה קודמת נתנה 1.008 למצב השחרור, מתוך הסך של היום מעוגל ל- 3.44×10^{34}). ההתנגדות שסגרה את הדרך נבחנה במקום הלא נכון.

מה זה עולה, ומה זה דורש. ההעברה אינה חינם: כ-15.6% מן התקציב ההתחלתי נמסרים לחומר העולה בחישוב הבסיסי, כ-16.5% בפתרון המצומד; בשחרור, כשהליבה נכללת, מסלול הירח מחזיק כ-17% מן התקציב (17.0–17.1%; 17.7% הוא החלק עבור האגס לבדו, בלי הליבה). אלה העברות בתוך המערכת, ולא אובדן ממנה. הדרך גם קובעת תנאי שמאמר 2 מנסח כדרישה: גוף האם חייב להיות עדיין כמעט אחיד בפנימו, עם $k \gtrsim 0.397$ בתחילת ההעברה, כאשר k מודד כיצד המסה מפוזרת בין המרכז לבין פני השטח (0.4 לכדור אחיד, כ-0.33 לכדור הארץ של היום עם הליבה שלו). כדור ארץ שהברזל שלו כבר התרכז אוגר פחות סיבוב באותו אורך יממה, והתקציב לא היה נסגר.

מה יש בידינו עכשיו: שבע תכונות שנמדדו, ותכונה שמינית — הנטייה — שירח מורם חייב ליצור מן הגאומטריה שלו; מודל התנגשות שמקבל כל אחת מהן בתוספת; והתנגדות להרמה שנעלמת כשתנאי המהירות נבחן בקו הקורטוציה ולא על פני השטח. חלק B מספר עכשיו איך הירח הגיע לשם.

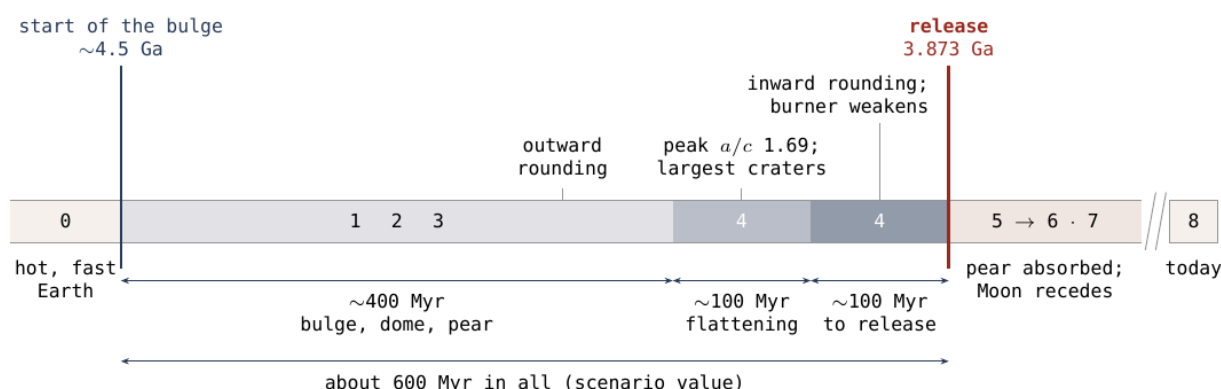
חלק B — התהליך בשלבים 0-8

הבעיה והגישה

מה קרה, באיזה סדר ובאילו מספרים? התשובה: תהליך רציף אחד בתשעה שלבים, הממוספרים מ-0 עד 8, מכדור ארץ חם ומהיר-סיבוב ועד הירח וכדור הארץ של היום. כל שלב מחושב או נמדד באחד המאמרים שבהמשך הסדרה, וכל שלב נושא מספר אחד שהקורא יכול להיאחז בו. השלבים מתרחשים בסביבת התהליך שהוצגה בפתיחת המאמר: כדור ארץ שמסתו 6.0455×10^{24} ק"ג — כדור הארץ והירח של היום יחד — שהתפשט בחום לרדיוס נפחי של 6,517 ק"מ, ומסתובב פעם אחת ב-5.5 שעות, לפני כ-4.5 מיליארד שנה.

חלק זה מספר את המודל כסיפור אחד, מתחילתו ועד סופו, בלי לעצור ולנמק כל צעד; הנימוקים נמצאים במאמרים הנזכרים בכל שלב, וחלק C מציג אותם מאמר אחר מאמר. הסיפור משתרע על כ-600 מיליון שנה, מתחילת הבליטה ועד שחרור הירח לפני 3.873 מיליארד שנה (Ga 3.873). החלוקה של פרק הזמן הזה היא ערך תרחישי גס, לא משך שנמדד: כ-400 מיליון שנה (Myr) לבליטה ולאגס, כ-100 מיליון שנה של פחיסות, וכ-100 מיליון שנה מסוף הפחיסות ועד השחרור (מאמר 3 (LEF Mechanism in Practice), טבלת הסביבה; מאמרים 4 המסלול (The Orbit), 6 המכתשים (The Craters), 7 הקטבים (The Poles)). הנקודה הקבועה היחידה בזמן היא הסוף: Ga 3.873 הוא הגיל שבו אופסו השעונים של הנוריתים של South Pole–Aitken, ובמודל האיפוס הזה הוא הניתוק עצמו (מאמר 8 (South Pole–Aitken)). איור B.1 מציב את השלבים על ציר הזמן הזה.

כמה זמן היה הירח "מחובר" תלוי במה שקוראים לו ירח, וראוי לומר זאת במפורש ולא להניח. אם הירח הוא החומר שלו, הוא החל להיאסף כשהבליטה החלה, כ-600 מיליון שנה לפני השחרור. אם הוא גוף שיושב על קצה האגס, הוא מתחיל בשלב 2. אם הוא גוף שמחזיק את עצמו בכבידתו שלו, הוא מתחיל רק בתחילת ההתעגלות פנימה, במרחק של כ-13,000 ק"מ ממרכז כדור הארץ (שלב 4). שלושתם אותו תהליך, הנראה מנקודות מבט שונות; הסדרה משתמשת בראשונה כשהיא מדברת על חלון הבנייה.



איור B.1. השלבים של חלק B על ציר זמן. הציר נמשך מתחילת הבליטה, בסביבות Ga 4.5, עד השחרור ב-Ga 3.873, גיל האיפוס של הנוריתים של South Pole–Aitken (מאמר 8), והלאה אל היום, אחרי הקטיעה. ההצללה מעמיקה לקראת השחרור, וכתובים בה צפיפות הגוף והחלק שכל קטע תופס בתולדותיו; שלושת המרווחים, כ-100, 400, ו-100 מיליון שנה, הם ערכי התרחיש הגסים של הסדרה (מאמרים 3, 4, 6, 7). מיקומי האירועים בתוך כל מרווח הם סכמטיים.

את האיור קוראים משמאל לימין. הרצועה הבהירה שלפני ההתחלה היא שלב 0, כדור הארץ החם שלפני הבליטה. המרווח הארוך ביותר, כ-400 מיליון שנה, מכיל את שלבים 1–3: הבליטה, הכיפה והאגס. שני המרווחים הכהים יותר מכילים את שלב 4: הגוף נפחס עם הסיבוב ויוצר את המכתשים הגדולים ביותר שלו, ואחר כך מתעגל פנימה בזמן שהחום שמתחת לצדו הרחוק נחלש. הקו האדום הוא השחרור, שלב 5; מימינו האגס נבלע בכדור הארץ (שלב 6) והירח מתרחק (שלב 7), עד הירח וכדור הארץ של היום (שלב 8).

הערה על המספור. מאמר 3 ממספר את שלביו שלו מבחץ פנימה, מנקודת המבט של הגוף: השלב 1 שלו הוא הקליפה השטוחה, השלב 2 הוא הגוף על קצה האגס, השלב 3 הוא ההתעגלות החוצה. בחלק זה השלבים ממוספרים לתהליך כולו, מ-0 עד 8, והקליפה השטוחה שייכת לשלב 1, הבליטה.

B.0 לפני הבליטה — כדור הארץ החם והמהיר

התהליך מתחיל מכדור ארץ שאינו כדור הארץ של היום. הוא מכיל את המסה של כדור הארץ ושל הירח יחד, 6.0455×10^{24} ק"ג, משום שאין הנחה שמהו נמלט: הירח כולו היה פעם חלק מכדור הארץ. הוא חם לכל עומקו, הברזל שלו עדיין שוקע לעבר המרכז כדי ליצור את הליבה, והחום הרחיב אותו בכ-120 ק"מ, לרדיוס נפחי של 6,517 ק"מ — כ-6,721 ק"מ בקו המשווה ו-6,128 ק"מ בקטבים, משום שהוא מסתובב מהר (מאמר 2 (LEF Mechanism in Principle)). הוא מסתובב פעם אחת ב-5.5 שעות. הקליפה החיצונית שלו סיאלית — עשויה סיאל, השכבה העליונה הקלה, העשירה בצורן ובאלומיניום, שמונחת מעל הסימה הצפופה יותר, העשירה בצורן ובמגנזיום — והיא קרה וקשיחה (מאמר 3, B.1§). אטמוספירה של אדים עוטפת אותו.

התנע הזוויתי. תנע זוויתי הוא כמות הסיבוב — מסה כפול מהירות צידית כפול המרחק מן הציר — והוא נשמר כל עוד שום פיתול חיצוני אינו פועל. גוף האם הזה מכיל $3.466 \times 10^{34} \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-1}$, מעט יותר ממה שכדור הארץ והירח מכילים יחד היום: 0.7% יותר בסכום הסקלרי, 1.5%–2.5% מול הסכום הווקטורי בזוויות שנבדקו (מאמר 2, A.6§). הסימן חשוב: ארבעה וחצי מיליארד שנים של גאות שהשמש מעוררת מוציאות תנע זוויתי מן המערכת, ולכן לגוף האם היה צריך להיות מעט יותר מהיום, לא פחות. המאזן נסגר רק עבור גוף אם שעדיין כמעט אחיד בפנימו: מקדם מומנט ההתמד שלו, k , המודד עד כמה המסה שלו רחוקה מן הציר (0.4 לכדור אחיד, פחות מזה כשהמסה מתרכזת במרכז), חייב להיות לפחות כ-0.397. הבנייה חייבת אפוא להתחיל מוקדם בהתארגנות הליבה, כשרק מעט מן הברזל כבר נאסף במרכז (מאמר 2, D.3§). ההתארגנות הזאת היא תהליך אחד ארוך ורציף, בלי גבולות חדים: מעט בהתחלה, יותר בזמן שהאגס גדל, ושלב ארוך מאוד עם חזרת האגס, שנמשך עד היום.

רדיוס הקורוטציה. נקודה על פני גוף מסתובב נעה הצידה במהירות שגדלה עם מרחקה מן הציר; המהירות שמסלול מעגלי חופשי דורש קטנה עם המרחק. השתיים שוות במרחק אחד, **רדיוס הקורוטציה** — המרחק שבו גוף שמסתובב עם כדור הארץ כבר נע במהירות של מסלול חופשי. עבור גוף האם של 5.5 שעות הוא נמצא ב:

$$r_c = 15\,818 \text{ km}, \quad v_c = 5\,020 \text{ m/s}$$

(מאמר 2, A.2.1§). המספר חשוב משום שהוא מסלק את הקושי הישן של הרמת ירח מכוכב לכת. על פני גוף האם הזה הסיבוב נותן כ-2,133 מ"ש', ואילו מסלול מעגלי דורש כ-7,701 מ"ש'; גוף שמשתחרר שם חסרים לו כ-5,568 מ"ש', והוא נופל בחזרה. ברדיוס הקורוטציה דבר אינו חסר: המהירות כבר קיימת, והסיבוב הוא שסיפק אותה. המודל כולו הוא תשובה לשאלה אחת — כיצד הגיע החומר של הירח מפני השטח אל הקו הזה, כשהוא עדיין מסתובב עם כדור הארץ.

האסימטריה ולחץ המקור. הברזל השוקע אינו שוקע באופן אחיד. אסימטריה בפנים מרכזת את הזרם העולה לאזור אחד, אזור הזנה מועדף מצפון לקו המשווה, שמאמר 3 קורא לו Lobe A (§A.4). במקור מחזיק גוף האם לחץ שנוצר ממשקל כל מה שמעליו:

$$p_s = 150 \text{ GPa} \quad (150.26)$$

ג'יגה-פסקל אחד (GPa) הוא כעשרת אלפים פעמים לחץ האוויר בגובה פני הים. הזרם העולה הוא לחץ, לא כוח: פותחים נתיב מן הפנים העמוק, והחומר הסחוט עולה בו, כמו משחת שיניים שעולה כשלוחצים על השפופרת. הרמת התכה עמוקה בצפיפות 3,500 ק"ג/מ"ק עד רדיוס הקורטוציה עולה 139.78 ג'יגה-פסקל ומשאירה 10.49 ג'יגה-פסקל עודף; המבחן עובר לכל התכה עמוקה קלה מכ-3,864 ק"ג/מ"ק ונכשל מעליה (מאמר 3, § A.9–10). התכה עשירה במים ובחומרים נדיפים אחרים עומדת בדרישה הזאת; התכה יבשה אינה עומדת בה. החומרים הנדיפים הם שמאפשרים את הירח.

מה יש לנו עכשיו: כדור ארץ חם, מורחב ומהיר-סיבוב, עדיין כמעט אחיד בפנימו, עם רדיוס קורטוציה ב-15,818 ק"מ ולחץ מקור של 150 ג'יגה-פסקל, שיכול להרים התכה קלה ועשירה בנדיפים עד הרדיוס הזה.

B.1 הבלטיה — הלחץ מבפנים

הלחץ מרים אזור אחד של פני כדור הארץ לבלטיה אחת (מאמר 3, § C.7). לפני שהבלטיה מתרוממת, הסיאל שמעל האזור עדיין שוכב שטוח מעל הזנה פעילה, ובשלב השטוח הזה מתחיל התייעוד של הירח. חומר עמוק מגיע אל הקליפה דרך פתחים ונזרק דרכם החוצה במהירויות של קילומטרים בשנייה. חלק ממנו חוזר ויורד על הקליפה (מאמר 3, § B.1; מאמר 6).

החוצה ובחזרה באותה מהירות. כדור שנזרק ישר למעלה, בלי אוויר שיאט אותו, חוזר אל היד במהירות שבה נזרק. חומר שנזרק מגוף האם עושה אותו דבר: 5 ק"מ/ש' החוצה, 5 ק"מ/ש' בחזרה. הסיבוב מוסיף דבר אחד. חומר שנזרק ישר למעלה שומר את המהירות הצידית שהייתה לו על פני השטח, אבל ככל שהוא עולה, המהירות הזאת מעבירה אותו בזווית קטנה יותר בכל שנייה מזו שפני השטח מסתובבים בה — ילדה שהולכת החוצה על קרוסלה מסתובבת מפגרת אחרי הקרשים שמתחתיה. כשהוא יורד, הקרקע כבר זזה מזרחה, והוא נוחת ממערב לפתח. בזריקה של 5 ק"מ/ש' המעוף מגיע לגובה 1,932 ק"מ, נמשך כ-28 דקות ונוחת כ-1,032 ק"מ מערבה — כאלף קילומטרים (מאמר 6, § K.1).

נחיתה של 5 ק"מ/ש' היא הלם. כששתי חתיכות מאותו חומר נפגשות חזיתית ב-5 ק"מ/ש', הלחץ מאחורי חזית ההלם הוא הצפיפות כפול מהירות החזית כפול מהירות החומר שמאחוריה: בבזלת, 2,700 ק"ג/מ"ק $\times 6,750$ מ"ש' $\times 2,500$ מ"ש', כלומר, באזור המגע:

$$p \simeq 46 \text{ GPa at the contact}$$

(45.6 ג'יגה-פסקל; מאמר 6, § J.2), מעל הלחצים שבהם המינרלים של הבזלת מתחילים לרשום הלם. ב-2 ק"מ/ש' אותו חישוב עדיין נותן כ-13 ג'יגה-פסקל. חומר חוזר יוצר אפוא מכתשים מן הסוג שהספרות קוראת כסימן של גוף שבא מן החלל. הכבידה אינה מרככת את הנחיתה; בדרך למטה היא מחזירה בדיוק את המהירות שלקחה בדרך למעלה.

המכתשים העתיקים ביותר של הירח נוצרים עכשיו. הם נוצרים על כדור הארץ, בקליפה שעדיין שייכת לכדור הארץ, לפני שהירח קיים כגוף. כמעט כל המכתשים של הירח, כ-99%, עשויים חומר ארצי שחזר; חומר זר, אם יימצא בכלל, יימצא בכמויות קטנות מאוד, מלבד אבק החלל (מאמר 6). הדבר חשוב לכל מה שבא אחריו: פני השטח העתיקים ביותר של הירח לא נוצרו על הירח. הם נוצרו כאן, ונישאו למעלה.

הקליפה נאספת. הקליפה שתהפוך לעור של הירח נמשכת פנימה מאזור בגודל האוקיינוס השקט — כ- 1.0×10^{14} מ"ר בלי הימים השוליים שלו, 1.65×10^{14} מ"ר איתם, פי 1.4 עד 2.4 משטח הכיפה העליונה שהיא תכסה — כמו מפה שפרושה על שולחן ונאספת פנימה כשמרימים את אמצעה (מאמר 3, § B.1). הקליפה אינה מחליקה רחוק; האיסוף הזה פנימה שייך לשלב השטוח, לפני שהכיפה קיימת.

מה יש לנו עכשיו: בליטה אחת שמתרוממת מתחת לקליפת סיאל קשיחה; פתחים בקליפה שזורקים חומר שחוזר במהירות שבה יצא, 5 ק"מ/ש' החוצה ובחזרה, 28 דקות באוויר, כאלף קילומטרים מערבה, ונוחת בלחץ של 46

B.2 הכיפה — גוף על קצה רחב

הבליטה גדלה לגוף שיושב על הקצה של השלוחה העולה של כדור הארץ. הקצה רחב: המגע בין הגוף לקצה הוא ברוחב 6,000 ק"מ. הגוף הוא כדור פחוס על הקצה הזה, בשני חלקים. הכיפה התחתונה שלו שוכבת על הקצה המעוקל ועוקבת אחריו — הקצה, שרדיוס העקמומיות שלו כ-4,000 ק"מ, חודר אל הגוף כ-1,350 ק"מ מתחת לאמצע המגע, כמו ראש שנדחף כלפי מעלה לתוך כובע שנמשך עליו. הכיפה העליונה שלו מתנשאת מעל התחתונה ועומדת

3 650 km above the rim of the contact

כלומר 3,650 ק"מ מעל שפת המגע (מאמר 3, B.2§). שני שלישים מפני השטח הם הכיפה העליונה (7.0×10^{13} מ"ר, 67%), ושליש הוא הכיפה התחתונה שעל הקצה (3.4×10^{13} מ"ר, 33%).

הצפיפות נובעת מן הצורה. המסה היא מסת הירח; הצורה קובעת את הנפח, 5.65×10^{19} מ"ק, כפי שניים וחצי מנפח הירח היום; ושניהם יחד קובעים את הצפיפות: 1,300 ק"ג/מ"ק. ככל שהכיפה גבוהה יותר מעל אותו מגע, הצפיפות נמוכה יותר — כיפה בגובה של חצי כדור נותנת כ-2,000 ק"ג/מ"ק, והכיפה הנמוכה ביותר האפשרית, 2,450 ק"מ, נותנת את 3,344 של היום (מאמר 3, איור 7). הכיפה הגבוהה שאומצה אינה בחירה חופשית. 1,300 ק"ג/מ"ק הוא המצב המוקצף שמבחן הלחץ של שלב 0 דורש — התכה מלאה בועות גז, קלה מן החומר שהיא עשויה ממנו, כמו בצק תופח שקל מן הקמח והמים שלו — והיא הצפיפות שבה מתחילה הפחיסות של שלב 4 (מאמר 7). הגרסה הקודמת של מאמר זה שרטטה את השלב כחצי כדור אחד על בסיס ברוחב 6,000 ק"מ, עם שטח פנים של 56.5 מיליון קמ"ר (5.65×10^{13} מ"ר), פי שלושה מחצי הכדור הרחוק של הירח (מאמר 2, E12; מאמר 11 (The Requirements), B.3§). מאמר 3 החליף אותה בשתי כיפות על קצה מעוקל; הצפיפות, 1,300 ק"ג/מ"ק, וסדר הגודל של השטח נשמרים, ובשתי התמונות אף אחד מהמספרים אינו נבחר: הם נובעים מן הבסיס.

אותה מסה ירחית	על הקצה (שלב 2)	כדור בשחרור	הירח היום
פני השטח כולם	מ"ר 1.04×10^{14}	מ"ר 4.49×10^{13}	מ"ר 3.79×10^{13}
נפח	מ"ק 5.65×10^{19}	מ"ק 2.83×10^{19}	מ"ק 2.20×10^{19}
רדיוס	(שתי כיפות) —	ק"מ 1,890	ק"מ 1,737
צפיפות	ק"ג/מ"ק 1,300	ק"ג/מ"ק 2,600	ק"ג/מ"ק 3,344

טבלה B.1. מסה אחת בשלושה מצבים (מאמר 3, B.2§). קוראים מימין לשמאל: הגוף נעשה קטן וצפוף יותר.

הטבלה היא תולדות הצפיפות של הירח בשלוש עמודות. אותה מסה גדולה וקלה על הקצה, כדור של 1,890 ק"מ בשחרור, והיום כדור של 1,737 ק"מ ב-3,344 ק"ג/מ"ק. ההצללה מעמיקה לאורך השורות לעבר הצפיפות, הגודל שמניע את כל הרצף.

הגוף עדיין מוחזק. בשלב זה הכבידה העצמית של הגוף — המשיכה של המסה שלו עצמו, שמחזיקה אותו יחד — קטנה לעומת המתיחה הגאותית של כדור הארץ, ההפרש בין משיכת כדור הארץ על צדו הקרוב של הגוף לבין משיכתו על צדו הרחוק. היחס ביניהן הוא כ-0.11: המשיכה העצמית של הגוף היא כתשיעית מן המתיחה (מאמר 3, B.2§). הגוף מוחזק אפוא בידי כדור הארץ; הוא כיפה על קצה, עדיין לא גוף בפני עצמו.

הקליפה עולה איתו, ומחליקה אל הקצה. קליפת הסיאל הקשיחה של שלב 1 עולה עם גוף האגס, כמו שעור הבלון עולה עם הבלון; תוך כדי העלייה היא נפרדת לאט ממה שמתחתיה ומחליקה במעלה האגס אל קצהו, אל תוך הגוף, ושם היא נעשית פני השטח של הכיפה העליונה ואחר כך הקרום של הירח (מאמר 3, B.3§). זו הסיבה

שהקצה מתנתק כגוף בפני עצמו. הדרישה שהופכת אותה לקליפה היא קשיחות: צמיגות של כ- 10^{23} פסקל. שנייה או יותר — צמיגות היא ההתנגדות לזרימה איטית; לדבש יש יותר ממים, ולקליפה קרה הרבה מאוד יותר משניהם — ששומרת על מכתש ברוחב 100 ק"מ מלשקוע במשך עשרה מיליון שנה בכבידה של גוף האם, 8.25 מ"ש² (מאמר 3, B.6§). קליפה ששומרת על המכתשים שלה נושאת אותם: מכתש שנוצר עליה לפני שכוסתה או נישאה הולך איתה ושומר על גודלו. הקרום העבה של הצד הרחוק בנוי משכבות רבות של הסיאל הזה, שנדד אל הקצה בתקופת הבליטה, בכוחות הסיבוב, ונדחס שם, יחד עם חומר שחזר ונחת עליו שוב ושוב (מאמרים 3, 11). עד כמה עמוק הוא מגיע אינו נקבע כאן; ייתכן שהוא עמוק הרבה יותר ממה שהונח עד כה.

מה יש לנו עכשיו: גוף קל במסת הירח, 1,300 ק"ג/מ"ק, היושב ככיפה עליונה מעל כיפה תחתונה על קצה ברוחב 6,000 ק"מ, והכיפה העליונה בגובה 3,650 ק"מ; עדיין מוחזק בידי כדור הארץ; ולובש את קליפת הסיאל של כדור הארץ, עם המכתשים שלה, כעורו.

B.3 האגס — היכן עמד, ולכן נטה

מתחת לגוף נמשך כדור הארץ עצמו החוצה. הלחץ מותח את הבליטה האחת לאגס מן החומר של כדור הארץ עצמו: רחב בבסיסו שעל פני כדור הארץ, הולך וצר כלפי חוץ, והגוף על קצהו (מאמר 3, C.7§). האגס אינו צינור שדרכו נשאב חומר; הוא גוף של כדור הארץ, עומד.

כדור הארץ מחזיק אותו. מעבר צר אינו יכול לעשות את העבודה הזאת: מאמר 3 מראה שמעבר גלילי חסר מסה נכשל במאזן העומסים, שעובר רק מעל רדיוס של כ-1,000 ק"מ (1,017 ק"מ), ושם המעבר כבר מכיל כחצי מסת ירח (A.13§). החיבור חייב להיות רחב, חם ומסיבי, והוא נושא את העומס הצידי שלו בזכות צורתו. האגס עומד בכך: הוא קשת אחת בלי מותניים. הוא חלק מכדור הארץ, ומה שמחזיק אותו הוא הכבידה של כדור הארץ, כמו כל חלק אחר של כדור הארץ; הוא אינו נזרק החוצה, משום שמהירותו אינה מהירות של זריקה והוא לא עבר את קו הקורטוציה. את רוחבו חוסמת מלמעלה אנרגיית ההרמה שלו:

בסיס האגס	מסת האגס	העבודה להרמתו
ק"מ 9,000	מסות ירח 8.8	ג'אול 8.1×10^{30}
ק"מ 10,000	מסות ירח 10.4	ג'אול 9.3×10^{30}
ק"מ 11,000	מסות ירח 12.1	ג'אול 1.05×10^{31} סדר הגודל של אנרגיית היווצרות הליבה

טבלה B.2. הרוחב, המסה ועבודת ההרמה של האגס בשחרור (מאמר 3, C.7§). הכתום מעמיק עם העלות.

בסיס רחב יותר מכיל יותר מסה, והרמת מסה גדולה יותר עולה יותר עבודה; ב-11,000 ק"מ העבודה מגיעה לסדר הגודל של האנרגיה שמשתחררת בשקיעת הברזל אל הליבה, בסדר גודל של 10^{31} ג'אול. הסדרה לוקחת את הבסיס כ-9,000–11,000 ק"מ. מרוחב הבסיס הזה מאמר 3 גוזר את מסת האגס: כתשע עד שתים-עשרה מסות ירח — כתשע, כ-11% ממסת כדור הארץ, לבסיס של 9,000 ק"מ (מאמר 3, C.9§; מאמר 11, R10); מאמר 9 הפסים (The Stripes) מתיר שבע עד שתים-עשרה. הרמתו עולה כ- 8×10^{30} ג'אול, יותר מפי חמישה (כפי 5.4) מהרמת הירח עצמו (גרסה קודמת אמרה כפי שישה) (כ- 1.5×10^{30} ג'אול). הברזל השוקע שמניע את הזרם העולה הוא אותה התפתחות שמשלמת על האגס. כל עוד האגס עמד, ליבת כדור הארץ נמשכה 270–370 ק"מ לעברו (מאמר 3, E.5§).

הוא גדל, וקצהו נעשה צר. בין ההתחלה לשחרור האגס מכפיל בערך את אורכו, מכ-4,000 לכ-8,700 ק"מ מעל פני כדור הארץ; הקצה שלו נעשה צר בחצי, מ-6,000 ל-3,000 ק"מ, בזמן שהגוף שעליו מתעגל החוצה (שלב 4). האגס כולו נמצא בתוך קו הקורטוציה. לכל אורכו הכבידה האפקטיבית מכוונת לעבר כדור הארץ, ולכן האגס

דחוס לאורכו, אין לו מותניים שיכולים להיצבט, ו — כשהירח הלך — שום חלק ממנו אינו יכול להישאר במסלול (מאמר 3, C.7§).

היכן עמד. בסיס האגס עמד על פני כדור הארץ ליד Kiritimati, באי Line שבמרכז האוקיינוס השקט,

base: 1.9°N, 157.5°W

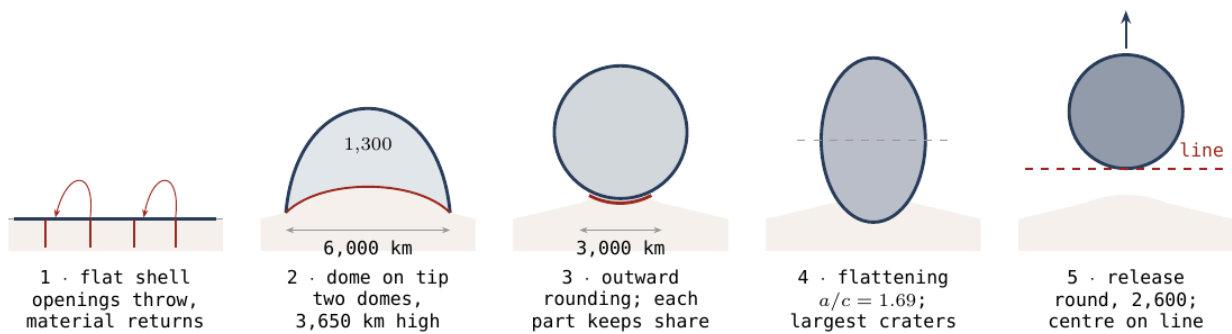
כלומר הבסיס ב-1.9° צפון, 157.5° מערב, מעל ה-LLVP של האוקיינוס השקט (אזור איטי גדול במעטפת התחתונה; Large Low-Velocity Province) — אזור רחב בתחתית המעטפת, הנראה בהדמיות סייסמיות, שגלי רעידות אדמה עוברים בו לאט יותר מאשר במעטפת שסביבו. הנקודה שליד Kiritimati נמצאת בתוך האזור האיטי בכל חמשת מודלי האשכולות שנבדקו, ובתוך קו המתאר של 1% — בשני מודלים טומוגרפיים, SMEAN (SMEAN2-2.25%) ו-SMEAN2-2.36%; מרכז האזור נמצא 1,657–1,476 ק"מ דרום-דרום-מערבית לה (מאמר 3, E.4§).

לאן נטה. האגס לא עמד זקוף. החלק החיצוני שלו, שנישא הרחק מן הציר, היה צריך לנוע מהר יותר הצידה כדי לעמוד בקצב הסיבוב של כדור הארץ, והוא פיגר — כמו שזרועות של מחליקה מפגרות כשהיא פורשת אותן — ולכן האגס כולו נטה אחורה, מערבה, וקצהו והירח שעליו נגררו מאחור (מאמר 3, C.8§). הוא נטה גם צפונה, מבסיס ליד קו המשווה לקצה בכ-22.5° צפון, קו הרוחב של השחרור של מאמר 4; הסיבוב אינו נותן את הנטייה הזאת, שכן הדחיפה הצידית שלו מכוונת תמיד לעבר קו המשווה; ההזנה המלוכסנת מן המקור הצפוני היא שנותנת אותה (מאמר 3, B.1§). האגס גם האט את כדור הארץ: כשנשא חומר החוצה, הוא לקח תנע זוויתי מן הסיבוב של כדור הארץ (שלב 5).

טביעת הרגל של הקצה נראית היום. כשהאגס נאסף בחזרה אל כדור הארץ, הקצה ירד ממערב לבסיס והשאיר את קווי המתאר שלו על קרקעית צפון האוקיינוס השקט: שתי כפיפות, שבהן הפסים החיצוניים ביותר עוזבים את קווי הרוחב המקבילים שלהם ופונים זה אל זה, ב-23.8° צפון 164.9° מזרח וב-5.3° דרום 173.2° מזרח (מאמר 9, C.1§). שתי הכפיפות

3 360 km apart (3,040–3,700), centre 9.3°N, 169.3°E

רחוקות זו מזו 3,360 ק"מ (3,700–3,040), ומרכזן ב-9.3° צפון 169.3° מזרח, כ-3,760 ק"מ ממערב לבסיס (3,762 ק"מ לפי הקואורדינטות; גרסה קודמת נתנה 3,770), בצד הנגרר. הבסיס והשפה הדרומית של הקצה נמצאים על קו המשווה של מערכת הפסים; מרכז הקצה נמצא כ-15° צפונה ממנו (מאמר 9, C.2§). טביעת הרגל הזאת אינה ה-22.5° של השחרור: קו הרוחב של השחרור הוא הכיוון של מרכז הירח כפי שהוא נראה ממרכז כדור הארץ בזמן שהאגס עמד, ואילו טביעת הרגל היא המקום שבו ירד הקצה כשהאגס נאסף בחזרה, במערכת הייחוס של הפסים — שני גדלים שונים במערכות ייחוס שונות. הרוחב נופל בין המגע של 3,000 ק"מ בשחרור לבין הכיפה של 3,650 ק"מ: האזור שהפסים פונים אליו רחב כמו הקצה. בתוכו, תמונת ראי של הצד הקרוב בגודל הירח שעל הקצה — גדול מן הירח של היום פי 1.37, השורש השלישי של 3,344 חלקי 1,300 — מציבה את Imbrium, Serenitatis ומרכז המגע בתוך טביעת הרגל (מאמר 9, C.3§). כל המיקומים האלה נתונים במערכת הייחוס של היום; כיצד זז ציר כדור הארץ מאז אינו נפתר בסדרה ונשאר לעבודה עתידית.



איור B.2. הגוף על קצה האגס, מן הקליפה השטוחה ועד השחרור (שלבים 1–5; על פי מאמר 3, איור 5, ומאמר 7). כחול כהה: הקליפה, שעולה עם האגס ומחליקה אל קצהו, כעור של הגוף. אדום: הפתחים בקליפה השטוחה (1), הכיפה התחתונה על הקצה המעוקל (2) והמגע (3). ההצללה מעמיקה עם הצפיפות, מ-1,300 עד 2,600 ק"ג/מ"ק. הפחיסות (4) משורטטת סביב ציר הסיבוב, השוכב אופקית בתמונה. סכמטי, לא בקנה מידה.

איור B.2 הוא הסיפור של שלבים 1–5 בחמש תמונות. עקבו אחרי הקו הכחול הכהה: בראשונה הוא שוכב שטוח, בשנייה הוא הופך לעור של הכיפה העליונה, והוא נשאר העור של הגוף לאורך ההתעגלות, הפחיסות והשחרור. עקבו אחרי הקו האדום: המגע נעשה צר מן הכיפה התחתונה של 6,000 ק"מ אל הדיסקה של 3,000 ק"מ, ומשתחרר בקו הקורטציה.

מה יש לנו עכשיו: אגס של תשע עד שתיים-עשרה מסות ירח, שבסיסו ברוחב 9,000–11,000 ק"מ ליד Kiritimati מעל ה-LLVP של האוקיינוס השקט, מוחזק בכבידה של כדור הארץ כחלק ממנו, בתוך קו הקורטציה, נוטה אחורה מערבה וצפונה, והגוף על קצהו; ועל קרקעית האוקיינוס השקט, בין שתי כפיפות של הפסים, טביעת הרגל של אותו קצה.

B.4 ההתעגלות — החוצה, פחיסות, פנימה

כשהוא עדיין מחובר ומסתובב עם כדור הארץ, הגוף משנה את צורתו שלוש פעמים: הוא מתעגל החוצה, נפחם עם הסיבוב, ומתעגל פנימה. כל שינוי כותב על הירח משהו שנקרא היום: ההתעגלות החוצה כותבת את הצד הקרוב ואת הצד הרחוק, הפחיסות את המכתשים הגדולים ביותר, וההתעגלות פנימה את הקטבים הצפופים (מאמרים 3, 7).

ההתעגלות החוצה: כל חלק שומר על חלקו. ככל שהכבידה העצמית של הגוף גדלה, הגוף הפחוס שעל הקצה הופך לכדור, בנפח קבוע. המגע נעשה צר מ-6,000 ל-3,000 ק"מ ונשאר מחובר. הטבעת של הכיפה התחתונה שבין השניים — הטבעת המקולפת — מתקלפת מן הקצה, מן השפה פנימה, יחד עם הסיאל שעליו יושבה: הסיאל גולש במעלה האגס לכיוון הקצה — כיוון ההתמיינות החוצה — והולך עם הגוף; את הגלישה מקלה, בכוחות הגזירה, השכבה ה"משומנת" שבין הסיאל לסימה. התמונה היומיומית היא כדור חצי-ריק שנלחץ על מעמד מעוגל ואחר כך מנופח: הדופן שלו מתקלפת מן המעמד מן השוליים פנימה (מאמר 3, C.4a§). כ-1,500 ק"מ של תנועה פנימה של שפת המגע, על ממשק חלש. הקילוף מ-6,000 ל-3,000 ק"מ, וההתעגלות שעמו, נמשכו מיליוני שנים: לאט בהתחלה ומהר יותר לקראת הסוף — מאות מיליוני שנים בחלק המוקדם, עשרות מיליונים בחלק המאוחר. היכן כל חלק של פני השטח מגיע בסוף נקבע בכלל אחד: **בהתעגלות החוצה כל חלק שומר על חלקו בפני השטח** (מאמר 3, B.4§).

החלק על הקצה	חלק	מן הנקודה התת-ארצית	על הירח
--------------	-----	---------------------	---------

המגע, 3,000 ק"מ	7%	0°–31°	כיפה בצד הקרוב ברוחב כ-1,900 ק"מ, שנחשפת רק בשחרור
הטבעת המקולפת	26%	31°–70°	החגורה, שנחשפת במהלך ההתעגלות החוצה
הכיפה העליונה	67%	70°–180°	הצד הרחוק, חשוף מן ההתחלה, ומכתשיו נישאו למעלה

טבלה B.3. כלל ההעתקה (מאמר 3, B.4§). אדום, כתום, כחול: מן החלק שנגע בכדור הארץ עד הסוף, אל החלק שהיה פתוח לחלל מן ההתחלה.

חלק מפני השטח של כדור, הנמדד מנקודה אחת, הוא זווית קבועה מאותה נקודה: כיפה שמכילה 7% מפני השטח מגיעה עד 31° ממרכזה, וכיפה שמכילה 33% מגיעה עד 70°. הנקודה היא הנקודה התת-ארצית, הנקודה של הגוף שפנתה ישירות אל כדור הארץ. לכדור יש שטח פנים קטן משל הגוף הפחוס — 7.1×10^{13} לעומת 1.04×10^{14} מ"ר, גורם של 0.68 בשטח ו-0.83 באורך — אבל משום שכל חלק שומר על חלקו, השינוי זהה בכל מקום ואינו מזיז שום אזור ושום מכתש ביחס לאחר, כמו תצלום מוקטן ששומר כל דמות במקומה. הכלל קובע את גודל האזורים; המפה קובעת היכן הם נמצאים היום. מרכז המגע הוא קצה האגס, בערך ב-22°–24° צפון; המבחינים של הסדרה מודדים את שלושת האזורים סביב 24.1° צפון 335.2° מזרח, מרכז המגע כפי שהמחבר שרטט אותו, 34.0° מן הנקודה התת-ארצית של היום (מאמר 11). כשקוראים אותם על המפה, האזורים מקוננים זה בזה: בסיס הבליטה, 6,000 ק"מ, שמרכזו ב-16.6° צפון 13.1° מזרח, מכיל 99% משטח הבזלת הכהה של הימות בצד הקרוב; המגע האחרון, 3,000 ק"מ, מכיל שני שלישים מן השטח הזה (66%) — חלקים של שטח, לא ספירה של ימות (מאמר 5); ו-Mare Imbrium, הפתח שדרכו נכנסה ההזנה, נמצא בתוך המגע (מאמר 3, B.4§). הגרסה הקודמת של מאמר זה מיקמה את שפת כיפת המגע בכ-41°; כלל החלקים מציב אותה ב-31°.

הפחיסות. גוף רך שמסתובב מהר מקבל את צורת *Maclaurin*, צורת שיווי המשקל המדויקת של נוזל אחיד מסתובב: רחב יותר בקו המשווה, נמוך יותר בקטבים. הגוף הקל, שמסתובב עם כדור הארץ פעם אחת ב-5.5 שעות בצפיפות 1,300 ק"ג/מ"ק, נפחס מאוד, משום שכבידתו העצמית חלשה לעומת הסיבוב:

$$a/c = 1.69 \text{ at the start of the rounding, at } 12\,994 \text{ km}$$

כלומר $a/c = 1.69$ בתחילת ההתעגלות, במרחק 12,994 ק"מ, כאשר a/c הוא הרדיוס המשווני חלקי הרדיוס הקוטבי, 1.00 לכדור (מאמר 7, C.1). המרחק 12,994 ק"מ הוא גבול רוש הקשיח לגוף בצפיפות 1,300 ק"ג/מ"ק — המרחק שמעבר לו הכבידה העצמית של גוף יכולה להחזיק אותו יחד מול המתיחה הגאותית של כדור הארץ — ולכן הגוף מתחיל להחזיק את עצמו, ולהתעגל פנימה, באותו מרחק שבו הוא נעשה מסוגל לשרוד (מאמר 7; "כ-13,000 ק"מ" במאמר 3). בפחיסות נוצרים רוב המכתשים, והגדולים שבהם: ההפרדה של החומר העמוק התקדמה, החומר שנזרק החוצה קל ועשיר במים, והקטבים, שנוצרו בהתעגלות החוצה, מקבלים את חלקם (מאמר 3, B.6§). זרימות יציאה גדולות שייכות לפחיסות, והקרום של הצד הרחוק נבנה בה שכבה על שכבה, מן הסיאל ומן החומר החוזר.

ההתעגלות פנימה. כשהגוף עולה לאורך האגס הוא נעשה צפוף; כבידתו גדלה; הפחיסות נרגעת והוא מתעגל פנימה. הקליפה, הקשיחה, אינה מתכווצת עם פני השטח: המכתשים שעליה שומרים על גודלם, ופני השטח שביניהם נסגרים, יותר מכול בקטבים — כמו שהרווחים בין כפתורים התפורים על בד נסגרים כשהבד נאסף, והכפתורים נשארים באותו גודל (מאמר 3, B.6§; מאמר 7).

על קצה האגס	צפיפות	יממת כדור הארץ	a/c	צפיפות קוטבית שהיא משאירה
-------------	--------	----------------	-------	------------------------------

1.59	1.69	שעות 5.50	1,300	תחילת ההתעגלות, ~13,000 ק"מ
1.38	1.44	שעות 5.55	1,600	על האגס, עולה
—	1.30	שעות 5.62	2,000	על האגס, מתעבה
—	1.24	שעות 5.70	2,300	הצד הרחוק מגיע לקו
1.17	1.20	שעות 5.77	2,600	שלב מחובר מאוחר
1.0	עגול, ≤ 1.04	שעות 5.77	2,600	המרכז על הקו — שחרור
—	1.00	—	3,344	היום

טבלה B.4. צורת הגוף לאורך הטיפוס (מאמר 3, C.7§; מאמר 7). הכחול הכהה דוהה ככל שהפחיסות נעלמת; העמודה האחרונה היא יחס צפיפות המכתשים בין הקטבים לקו המשווה שהתעגלות מאותה צורה משאירה (מאמר 7).

קראו את הטבלה מלמעלה למטה: הצפיפות עולה, יממת כדור הארץ מתארכת מעט, ויחס הצירים יורד מ-1.69 לעבר 1. מכתש שנוצר בשיא הפחיסות נישא לאורך כל ההתעגלות ומסיים צפוף פי 1.59 בכיפות הקוטביות מאשר בחגורה המשוונית; מכתש שנוצר מאוחר, על צורה של 1.20, מסיים צפוף פי 1.17; מכתש שנוצר אחרי השחרור, על גוף עגול, אינו צפוף יותר כלל. החיזוי אינו אפוא מספר אחד אלא טווח שעולה עם גיל המכתשים, ולכן גם עם גודלם, שכן רוב המכתשים הגדולים נוצרו מוקדם. הוא נמדד. בספירה נקייה — הימות ו-South Pole-Aitken הוצאו משני הצדדים, כך שקרקע עתיקה מושווית לקרקע עתיקה, כיפות של 30° מול החגורה שבתוך 15° מקו המשווה — יחס הקטבים לקו המשווה הוא

$$1.20 \pm 0.05 \text{ for craters } \geq 20 \text{ km, rising to } 1.53 \text{ for } 60\text{--}100 \text{ km}$$

כלומר 1.20 ± 0.05 למכתשים של 20 ק"מ ומעלה, ועולה ל-1.53 למכתשים של 60–100 ק"מ — 1.09 ל-20–30 ק"מ, 1.15 ל-30–40, 1.26 ל-40–60, 1.53 ל-60–100, ו- 1.84 ± 0.38 למעטים של 100–300 ק"מ (מאמר 7, D.1–D.2). הסדר והטווח הם מה שהמודל חוזה. המכתשים לא התכווצו עם פני השטח: הקוטר שבו קערות פשוטות מפנות את מקומן למכתשים מורכבים עם פסגות מרכזיות נמצא ב-16.5–17.1 ק"מ בצד הרחוק וב-14.3–15.1 ק"מ בצד הקרוב, בלי הבדל קנה מידה ביניהם, והמכתשים הקוטביים הם, אם כבר, הגדולים יותר (מאמר 3, B.6§; מאמר 7, D.5§).

הברנר. כל עוד הגוף היה מחובר, הפתחים בצדו הקרוב הוזנו מכדור הארץ דרך המגע, ומולם, מתחת לצד הרחוק, נאסף חום: הברנר של מאמר 8 — חום מפנים כדור הארץ שחצה את הגוף המחובר לאורך קו הפתחים וחימם את הצד הרחוק מלמטה, כמו להבה שמחממת את תחתית הסיר. היו לו שתי יציאות, הקרויות על שם הפתחים של הצד הקרוב שמולם הן נמצאות: **Imbrium**, **הראשית**, ו-**Serenitatis**, **המשנית**. החום הגיע אל פני השטח במקום שבו הקרום היה דק. שם התרומם האזור לכיפה; הקרום שהתרכך החליק החוצה אל הצדדים, ושם נערם לטבעת מעובה; חומר נדיף הורחק; שכבות החומר החוזר נאפו ונדחסו; וחומר עשיר בברזל מפנים כדור הארץ עלה אל בסיס האזור. המכתשים שעליו נמחקו או נרגעו: בתוך 10° ממרכז South Pole-Aitken, על קרקע שנוקתה ממישורי הלהבה, מן הימות ומהילה של 200 ק"מ סביב כל אחד מהם, צפיפות המכתשים של 20 ק"מ ומעלה היא 0.51 מזו שמחוץ לשפה ממש (מאמר 8). ההתכה שהתמצקה מעל הברנר מתוארכת בנוריטים של Chang'e-6: 4247 ± 5 מיליון שנה.

הכיפה של SPA נמצאת מדרום לשתי היציאות. מיקום האגס והכוחות של סיבוב כדור הארץ — הדחיפה האופקית בתוך האגס המסתובב — הוציאו את החום מדרום לנקודה שמול היציאות. על הצורה הפחוסה נמצא מרכז הכיפה כ- 17° – 21° מהן (17.0° מ-Serenitatis, 21.2° מ-Imbrium; היציאות הן הנקודות שמול Imbrium, 37.6° צפון 340.0° מזרח, ומול Serenitatis, הנלקח כאן ב- 27.3° צפון 18.4° מזרח); המעבר מן הצורה הפחוסה

לכדור פתח זאת אל 24°–29° של היום (24.1° ו-29.2°) (מאמר 8, §C.3–C.4). הברנר נחלש ככל שהקילוף הצר את המעברים: Serenitatis התקלפה ראשונה ונותקה מכדור הארץ; Imbrium נשארה מחוברת ונותקה אחרונה. אחרי השחרור החום היה חום הירח עצמו, יחד עם הקרינה של כדור הארץ הקרוב, שדעכה ככל שהירח התרחק; אחר כך הכול התקרר לאט, הימות תחילה ומרכז הירח מאוחר יותר, והכיפה התקררה, התכווצה וקרסה אל האגן העמוק שנראה היום — כמו סופלה, שהחום הרים אותו, ושוקע מתחת לשפתו כשהוא יוצא מן התנור.

הצד הרחוק נאטם; הצד הקרוב נשאר פתוח. הצד הרחוק, החשוף לקור החלל, איבד את חומו ואטם את פתחיו הישנים מוקדם, לפני השחרור; הלחץ שמתחתם נלכד (מאמר 5 הימות (The Maria)). הצד הקרוב פנה אל כדור הארץ החם: קרינה מכדור ארץ של כ-2,000 קלווין, עם מקדם צפייה של 0.205, החזיקה את פני השטח של הצד הקרוב בסביבות 1,345 קלווין, מעל הסולידוס — הטמפרטורה שבה החומר מתחיל להיתך — ולכן הצד הקרוב לא יכול היה לקפוא כל עוד היה מחובר, ופתחיו נשארו פתוחים (מאמר 5, §H.4).

מה יש לנו עכשיו: גוף שהתעגל החוצה ובכך כתב את הצד הקרוב, החגורה והצד הרחוק שלו; נפחס ליחס צירים של 1.69 ויצר את המכתשים הגדולים ביותר שלו; התעגל פנימה, והצפיף את קטביו ל- 1.20 ± 0.05 ועד 1.53 למכתשים הגדולים יותר; ומתחת לצדו הרחוק, ברנר עם שתי יציאות, שהרים ואחר כך הפיל את הכיפה של SPA, מדרום לשתי היציאות, ונחלש ככל שהמעברים הצרו לקראת השחרור.

B.5 השחרור — מרכז המסה על קו הקורוטציה

שני תהליכים פועלים על סיבוב כדור הארץ בזמן שהאגס עומד, בכיוונים מנוגדים (מאמר 2, §A.4). האגס המתארך נושא חומר החוצה ומאט את כדור הארץ, כמו מחליקה שמאטה כשהיא פורשת את זרועותיה: לבדו הוא היה מאריך את היממה ב-0.94 שעות, מ-5.50 ל-6.44 שעות, ומזיז את קו הקורוטציה מ-15,818 ל-17,569 ק"מ. הברזל שנאסף אל הליבה מקרב מסה אל הציר ומאיץ את כדור הארץ, כמו שהמחליקה מאיצה כשהיא מקרבת את זרועותיה: כשהליבה מאורגנת כפי שמאמר 2 מחשב (ריכוז $D = 2$), הוא מקצר את היממה ב-0.67 שעות. יחד:

$$T_{\oplus} = 5.77 \text{ h}, \quad r_c = 16\,399 \text{ km on the equator}, \quad 17\,287 \text{ km at } 22.5^\circ$$

כלומר יממה של 5.77 שעות, וקו קורוטציה ב-16,399 ק"מ על קו המשווה וב-17,287 ק"מ בקו רוחב 22.5° (16,331 ק"מ לגוף בעל מסה זניחה; 16,399 ק"מ כשמביאים בחשבון את מסת הירח עצמו במסלול של שני גופים; מאמר 2, §B.1; מאמר 3, §C.8). 16,399 ק"מ הם כ-2.6 רדיוסי כדור הארץ. מחוץ לקו המשווה גוף מסתובב במעגל קטן יותר סביב הציר, ויש לשאת אותו מעט יותר החוצה עד שמהירותו מתאימה למסלול: הקו נמצא ב- $r_c / \cos^{2/3} \varphi$, רחוק יותר ב-888 ק"מ בקו רוחב 22.5° מאשר על קו המשווה. הגרסה הקודמת של מאמר זה הציבה את מצב הסיום ב-17,570 ק"מ עם יממה של 6.44 שעות — האגס לבדו; כשהליבה מובאת בחשבון, מצב השחרור של הסדרה הוא 5.77 שעות ו-16,399 ק"מ.

הגוף עגול. בשחרור צפיפות הגוף 2,600 ק"ג/מ"ק ורדיוסו 1,890 ק"מ. הוא עגול, וקליפתו החיצונית קשיחה: קליפה בקשיחות של 10 ג'יגה-פסקל ומעלה מגבילה את יחס הצירים שלו ל-1.04 לכל היותר (מאמר 2, §B.7). הפחיסות וההתעגלות הסתיימו; הן קרו בזמן שהיה מחובר. הנקודה הקרובה שלו נמצאת כ-14,509 ק"מ ממרכז כדור הארץ, וצדו הרחוק כ-18,289 ק"מ; כדור הארץ עצמו, הפחוס מסיבובו, רדיוסו המשווני 6,701 ק"מ (מעט פחות מ-6,721 ק"מ של גוף האם בן 5.5 השעות, משום שעכשיו הוא מסתובב לאט יותר), ולכן כ-7,800 ק"מ מפרידים בין פני כדור הארץ לירח — האורך שהאגס מגשר עליו (מאמר 2, §B.1).

למה מרכז המסה, ולמה הקו. גוף שנע כיחידה אחת מגיב לסכום הכוחות הפועלים עליו, כאילו כל מסתו נמצאת במרכז המסה שלו. בתוך הקו משיכת כדור הארץ גדולה ממה שהתנועה המעגלית דורשת, ולכן הגוף לוחץ על המגע: המגע דחוס ומחזיק. הצד הרחוק מגיע לקו ראשון — בצפיפות 2,300 ק"ג/מ"ק וביממה של 5.70

שעות (טבלה B.4) — אבל כל עוד המרכז בפנים, הגוף עדיין לוחץ פנימה. כשהמרכז חוצה את הקו הסכום מתהפך, והגוף מתחיל למשוך את המגע (מאמר 3, C.5§).

הגוף נמשך ונתלש. המגע הוא שכבה חמה וצמיגה, לא משטח שנשבר. הוא מתנגד, אבל מעט: הגוף מתחיל להתקלף ממנו כשמרכז המסה שלו מגיע אל קו הקורוטציה ומנותק מעט אחריו, כ-210 ק"מ מעבר לקו. הוא אינו משתחרר בעדינות; הוא נמשך החוצה בכוח — וזה גם מה שמשך למעלה את רכסי השפכטל על הקרקעית שמתחת לקצה (שלב 6). הלחץ הפנימי שמתחת לגוף מסייע. בקו רוחב 22.5° העומס הרדיאלי מתאפס על הקו, ונשאר עומס צידי של 4.06×10^{22} ניוטון, לעבר קו המשווה; את העומס הזה נושא המגע הרחב, לא צוואר (מאמר 3, C.2§).

נישא, לא נזרק. האגס מרים את הגוף ונושא אותו סביב. על קו המשווה, ב-16,399 ק"מ, המהירות הצידיית שהסיבוב נתן לו היא 4.96 ק"מ/ש', ומהירות המסלול המעגלי שם היא אותם 4.96 ק"מ/ש': זו המשמעות של "על הקו" (מאמר 3, C.8§). לגוף שנזרק מנמוך על כדור הארץ יש גובה, אבל אין לו המהירות הצידיית של מסלול: אם נזרק ב-7 ק"מ/ש' מ-8,991 ק"מ, ראשו של גוף היושב נמוך על כדור ארץ של 5.5 שעות, הוא עולה עד 24,433 ק"מ וחוזר עד 854 ק"מ מן המרכז, עמוק בתוך כדור הארץ. רק הגוף שנישא מגיע עם המהירות שהוא צריך.

המאזן נסגר. האגס מעביר לירח כשישית מן התנע הזוויתי של המערכת, שנלקחה מן הסיבוב של כדור הארץ. בשחרור המערכת מכילה

1.007 times today's angular momentum

פי 1.007 מן התנע הזוויתי של היום — עודף של 0.7% בסכום הסקלרי, בסימן שאובדן הגאות השמשית דורש — ואילו מסלול הפיצול הקלאסי, שדורש שכדור הארץ יסתובב עד שיתפרק, צריך פי 2.74 מן התנע הזוויתי של היום (מאמר 2, B.6, §A.6.5§). ההתנגדות שסגרה את מסלול הפיצול — מאזן גדול בערך פי ארבעה מן הנדרש — חושבה על פני כדור הארץ, שם שחרור היה דורש מהירויות גדולות כל כך שהיו מפרקות את כדור הארץ. במסלול הזה האגס מרים את עצמו אל אזור הקורוטציה ומשחרר את החומר שבקצהו, כאן הירח: האגס גדל עד שהחומר שבקצהו מתנתק, ואז ההתמיינות מושכת את האגס בחזרה פנימה. ההתנגדות הקלאסית חישה על פני כדור הארץ; המסלול הזה מחשב בקצה האגס.

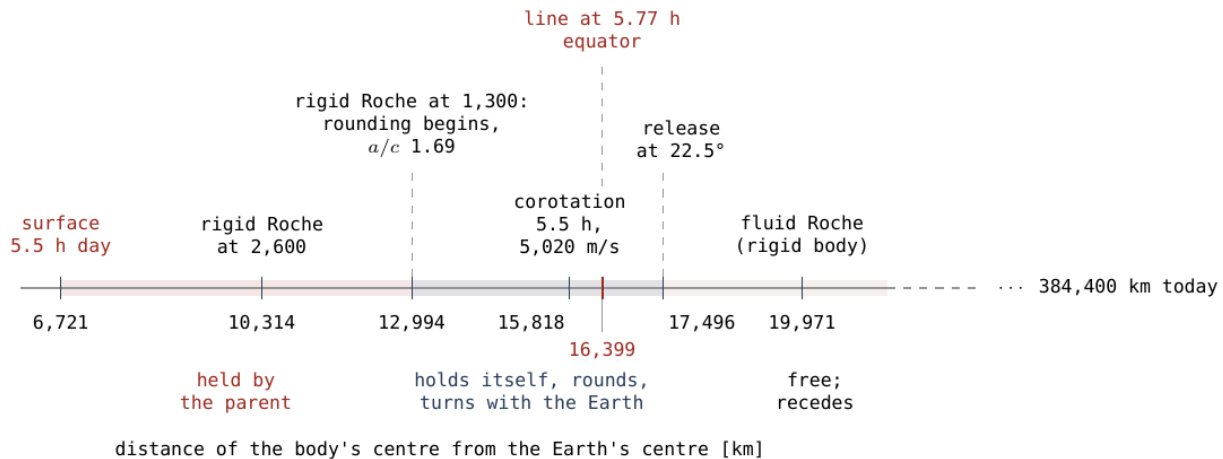
הגוף שורד. מרכז הירח נמצא הרבה מעבר לגבול רוש הקשיח של גוף בצפיפות 2,600 ק"ג/מ"ק, 10,314 ק"מ — כ-7,200 ק"מ מחוצה לו, ב-17,496 ק"מ (מאמר 4). הגבול הנוזלי, החל על גוף חסר חוזק, נמצא רחוק יותר, ב-19,971 ק"מ; הגוף הקשיח והעגול מוחזק בידי הקליפה שלו, והסדרה דורשת שפנימו יהיה קשיח מספיק כדי לעבור את 10^1 – 10^3 השנים שהוא שווה בתוך המרחק הזה (מאמר 2, D.3§).

מה השחרור עושה לירח. המגע של 3,000 ק"מ מתקלף מן הקצה. מעליו החום כבר המיס את הסיאל והחליק את פני השטח; הגוף יוצא עם הקליפה על צדו הרחוק, עם הסיאל המקולף על החגורה שלו, ומעל המגע עם פני שטח שהחום והכבידה החליקו (מאמר 3, C.4a§). הימות של הצד הקרוב היו עד עכשיו מעברים פתוחים של פנים האגס: דרכם עבר הלחץ של כדור הארץ מכדור הארץ, דרך האגס, אל תוך הירח, ולאורך כל תקופת החיבור הם נשארו חמים והעבירו מאגמה מן האגס אל הירח. בשחרור המעבר הזה נקטע. הימות אינם קופאים מיד: ברגע הניתוק הם חמים ובעלי צמיגות נמוכה, ולכן קרקעיותיהם חלקות, כמו אגם שקפא; הם קופאים רק אחרי הניתוק, לאט ומבחוץ פנימה, במשך מאות מיליוני שנים ועד מיליארד או שניים, כשמה שמחמם אותם הוא חום הירח עצמו — לא הלחץ של כדור הארץ — ובתחילה גם הקרינה של כדור הארץ הקרוב. קרקעיותיהם קפאו אפוא אחרי שכמעט כל החומר החוזר כבר נחת — ב-Mare Imbrium יש 11 מכתשים של 20 ק"מ ומעלה למיליון קמ"ר, לעומת 205 ברמות (מאמר 5). ימות המגע, שקפאו אחרונים, הם הנקיים ביותר.

מתי. הנוריתים של South Pole–Aitken התגבשו מעל הברנר לפני 4247 ± 5 מיליון שנה; אירוע מאוחר יותר איפס את השעונים שלהם ב-

— חזק מספיק כדי להפעיל מחדש את השעונים הרדיואקטיביים, לא כדי ליצור את החומר מחדש. במודל האירוע הזה הוא הניתוק עצמו, סוף השלב המחובר (מאמר 8, B14–B15). הוא נופל בסוף חלון הבנייה, כפי שהמודל דורש.

מה יש לנו עכשיו: ירח עגול וקשיח בצפיפות $2,600 \text{ ק"ג/מ"ק}$ וברדיוס $1,890 \text{ ק"מ}$, שנתלש אחרי שמרכזו עבר את קו הקורוטציה — $16,399 \text{ ק"מ}$ על קו המשווה, $17,287 \text{ ק"מ}$ בקו רוחב 22.5° — מעל כדור ארץ של 5.77 שעות, כשמהירות המסלול המעגלי כבר ניתנה לו, התנע הזוויתי של המערכת פי 1.007 מזה של היום, הימות של הצד הקרוב מנותקים מן הלחץ של כדור הארץ ועדיין חמים, והתאריך 3.873 Ga .



איור B.3. התהליך על ציר מרחק אחד, עם ערכי הייחוס של הסדרה (מאמרים 2, 3, 4, 7). שלוש הרצועות הן שלושת המשטרים הדינמיים: הגוף המוחזק בידי כדור הארץ, הגוף שמחזיק את עצמו ומתעגל בזמן שהוא מסתובב עם כדור הארץ, והירח החופשי. לא בקנה מידה מעבר לקטיעה.

איור B.3 הוא אותו סיפור כמו איור B.1, מסופר במרחק במקום בזמן. הביטוי תחילה בשלוש הרצועות: הרצועה האדומה, שבה הגוף מוחזק בידי כדור הארץ; הרצועה הכחולה הכהה, שמתחילה ב- $12,994 \text{ ק"מ}$, היכן שגוף בצפיפות $1,300 \text{ ק"ג/מ"ק}$ יכול לראשונה להחזיק את עצמו וההתעגלות פנימה מתחילה; והרצועה הבהירה שמעבר לשחרור ב- $17,496 \text{ ק"מ}$, שבה הירח חופשי. אחר כך הביטוי בשני הקווים שליד האמצע: קו הקורוטציה של גוף האם של 5.5 שעות, $15,818 \text{ ק"מ}$, והקו של כדור הארץ של 5.77 שעות בשחרור, $16,399 \text{ ק"מ}$. גבול רש הנזלי נמצא מעבר לשחרור; הירח אינו כפוף לו, משום שבשחרור הוא קשיח.

B.6 גורל האגס — נבלע בכדור הארץ

שחרור הירח אינו גורם לאגס לקרוס או לחזור. ההתמיינות פועלת על האגס בין שהירח עליו ובין שלא, ואחרי השחרור היא אוספת את האגס בחזרה אל כדור הארץ במשך עשרות עד מאות מיליוני שנים. האגס אינו עוזב את כדור הארץ: הוא נאסף בחזרה לתוכו ונבלע. מכיוון שכולו היה בתוך קו הקורוטציה, שום חלק ממנו אינו יכול להישאר במסלול; שום שארית של החיבור אינה נשארת צמודה לירח או מקיפה את כדור הארץ (מאמר 3, C.9§; מאמר 11, R10). המסה עוברת מגובה רב מחוץ לכדור הארץ לעומק רב בתוכו, והאנרגיה הפוטנציאלית שהיא מוסרת נכנסת לכדור הארץ כחום. הבליעה משאירה שלושה סימנים, כל אחד במקומו.

החלק הכבד שקע לבסיס המעטפת. האגס פעל כעמוד שיקוע: לאורכו הכבידה האפקטיבית כוונה לעבר כדור הארץ, ולכן חומר כבד ועשיר בברזל שקע בחזרה, וחומר קל עלה אל הקצה — ולכן הירח שמר רק ליבה קטנה. אחרי השחרור ירד החלק הכבד של האגס אל בסיס המעטפת מתחת לבסיס האגס, היכן שה-LLVP של האוקיינוס השקט עומד היום; מבחן המיקום עובר בכל מודל שנבדק (מאמר 3, חלק E). אנו מציעים —

בהסתייגות, משום שטבעם של האזורים העמוקים עדיין פתוח, וייתכן שהאזור של האוקיינוס השקט הוא בחלקו חומר הקשור לליבה שלא סיים להתמיין — שהאזור הזה הוא ברובו האגס שחור. המודל חוזה שהאזור של האוקיינוס השקט צפוף ועשיר בברזל יותר מן האזור האפריקני, נמוך ורחב יותר. ליבת כדור הארץ, שנמשכה 270–370 ק"מ לעבר האגס בזמן שעמד, חזרה כשהאגס נאסף בחזרה (מאמר 3, E.5§).

הדופן המובילה קופלה אל הפסים. כדור הארץ מסתובב ממערב למזרח, ולכן הצד המזרחי של האגס היה הצד המוביל שלו, שנדחק אל תוך הסיבוב, והוא נמתח בכיוון האחד הזה כל עוד האגס עמד. כשהאגס נאסף בחזרה, הדופן הזאת נמרחה על הקרקעית בכיוון הסיבוב וקופלה — הפסים הארוכים, הישרים והמקבילים של צפון האוקיינוס השקט: Clipperton, Molokai, Murray, Pioneer, Mendocino, Clarion (מאמר 9). הם קווי רוחב מקבילים של קו משווה אחד, ובסיס האגס נמצא על קו המשווה הזה, 1.6° ממנו. הם עוברים מתחת לרכסים הוולקניים שחוצים אותם, בלי להישבר: הם נוצרו בקיפול מן הצדדים ומלמטה, לא נחתכו מלמעלה. והם ארוכים כגובה האגס:

stripes 9 360 km against a pear of 9 680–9 800 km

פסים של 9,360 ק"מ לעומת אגס של 9,680–9,800 ק"מ — ממרכז הקצה עד הקצה המזרחי של Clipperton, קצרים ב-4% מן האגס, שאורכו נמדד מפני כדור הארץ ועד קו הקורוטציה בשחרור (מאמר 9, C.4§). דופן שמונחת לאורך הקרקעית מכסה קרקע באורך גובהה בערך, כמו עץ כרות ששוכב לאורך השווה לגובהו.

הגב התקמט אל הקשתות. הצד המערבי, גב האגס, נאסף בחזרה בלי סדר: הקשתות המקומטות של מערב האוקיינוס השקט ושל אינדונזיה — קשת Banda במרחק 8,100 ק"מ מן הבסיס, הפיליפינים ו-Sulawesi ב-9,040–9,070 ק"מ, Java ב-10,300 ק"מ, שוב היכן שאורך האגס מגיע (מאמר 9, B.8§). ממזרח לבסיס הסימנים מקבילים וישרים; ממערב לקצה הם מעוקלים, צפופים ופונים לכיוונים רבים. כשהקצה עצמו נמשך משם, השכבה הצמיגה שבינו לבין הקרקעית נמשכה למעלה לרכסים, כמו הרכסים שהשפכטל משאיר על הקיר: באזור הניתוק כל ההרים נמשכו מלמעלה — אלה רכסי השפכטל, שרשראות Marshall–Gilbert–Tuvalu במערב ואיי Line במזרח (מאמר 9, חלק D). הרים שנדחפו מלמטה יש לחפש במקום אחר, לא באזור הזה.

קו המשווה של הפסים. כשמתאימים אותם יחד, הפסים הם קווי רוחב מקבילים של קו משווה הנטוי לקו המשווה של היום ב- 10° לפחות (ההתאמה הראשונה 11° , וחוצה את קו המשווה של היום ב- 159° מערב, ליד הבסיס; עד כ- 20° מתאים כמעט באותה מידה) (מאמר 9, E.2§). הפסים לא הונחו כשהאגס עמד אלא כשנאסף בחזרה, אחרי השחרור; הם רושמים את קו המשווה של אותו זמן. עד אז עמדה מסה של שבע עד שתים-עשרה מסות ירח גבוה מעל צד אחד של כדור הארץ; כשנאספה אל כדור הארץ, השתנתה חלוקת המסה של כדור הארץ, וכדור הארץ יכול היה להתחיל לפנות לכיוון חדש. כמה רחוק פנה, באיזו מהירות וסביב איזה קו — זהו חקר הצירים, שהסדרה משאירה לעבודה עתידית.

כדור הארץ ממשיך לזרוק. השחרור לא סיים את פעילות כדור הארץ. הפתחים שלו המשיכו לזרוק חומר; רובו נפל בחזרה לכדור הארץ, וחלק הגיע אל הירח, שהיה אז גוף נפרד שמתרחק מכמה רדיוסי כדור הארץ. כדי להגיע אליו החומר היה צריך לצאת מהר יותר ויותר. כולו היה חם מאוד: החתיכות הגדולות יצאו תחילה, וכשסערת המאגמה שככה המשיכו להיפלט חתיכות קטנות, עדיין חמות (מאמר 3, C.11§; מאמר 6). הירח שמר את התיעוד. ברמות בלבד, כשכל הימות הוצאו משני הצדדים כך שההשוואה היא של דומה מול דומה, הצד הקרוב — הפונה תמיד אל כדור הארץ — נושא פי 1.19 מכתשים טריים של 1–2 ק"מ מן הצד הרחוק (1.12–1.27), והמכתשים שעל הימות מדורגים מגדולים ומותכים לקטנים וחדים (מאמר 6, מחקר 9; מאמרים 3, 5). שטף של גופים מבחוץ אינו חוזה שום עודף בצד הקרוב. כדור הארץ היה המפזר האחרון של המכתשים הקטנים על הירח.

מה יש לנו עכשיו: אגס שנבלע בכדור הארץ — החלק הכבד שלו ב-LLVP של האוקיינוס השקט מתחת לבסיסו, הדופן המובילה שלו בפסים, 9,360 ק"מ לעומת אגס של 9,680–9,800 ק"מ, הגב שלו בקשתות של מערב

האוקיינוס השקט ואינדונזיה — קו משווה של הפסים הנטוי ב- 10° לפחות לזה של היום, וכדור ארץ שהמשיך לזרוק חומר אל הירח אחרי השחרור.

B.7 ההתרחקות — המסלול ונטייתו

הנטייה היא קו הרוחב. הנטייה של מסלול היא הזווית בין המישור שבו הגוף מקיף לבין קו המשווה של כדור הארץ. גוף שמשתחרר בזמן שהוא מסתובב עם כדור הארץ בקו רוחב λ נע מזרחה לאורך מעגל הרוחב שלו; המסלול שהוא נכנס אליו חייב לעבור דרך מרכז כדור הארץ, כי לשם הכבידה מושכת; ומישור שעובר דרך מרכז כדור הארץ ודרך נקודה בקו רוחב λ , ופונה שם מזרחה, נטוי ב- λ לקו המשווה:

$$i_0 = |\lambda|$$

— שלוש שורות של אלגברה מתוך $\mathbf{h} = \mathbf{r} \times \mathbf{v}$, בלי מסה, בלי מרחק ובלי קצב סיבוב, ובלי שום דבר לכוון (מאמר 4, A.2§). כשהוא משתחרר ב- 22.5° , הירח מתחיל בנטייה של 22.5° . דיסקה אינה יכולה לעשות זאת: דיסקה של שברים שוקעת אל קו המשווה ומתחילה כמעט בלי נטייה, ולכן נטיית הירח הייתה בעיה פתוחה, ולכן כל תרופה לה בתמונת ההתנגשות מוסיפה לה משהו.

קו הרוחב. קו הרוחב שאומץ, 22.5° , הוא זה של מרכז אזור המגע, ברוחב כ-3,000 ק"מ, שעליו ישב הירח; הקצה העליון של קו הרוחב של הפתח, 25° , הוא מקרה רגישות (מאמר 4). הסדרה אינה טוענת שהגוף נע בקו הרוחב על המגע שלו לפני השחרור. בסיס האגס עמד בערך על קו המשווה של אותו זמן; אם קו המשווה ההוא הוא קו המשווה של היום — זו שאלה לחקר הצירים, שנשאר לעבודה עתידית.

כמעט מעגלי, ומתרחק מן ההתחלה. קו הקורטציה המתוקן לקו הרוחב נמצא ב-17,287 ק"מ; הירח מתחיל להיפרד כשמרכז המסה שלו מגיע אליו, ומשתחרר כ-210 ק"מ מעבר לו, ב-17,496 ק"מ, כשקצת יותר ממחצית הגוף כבר חצתה את הקו. שם הוא נע מעט מהר יותר ממה שמסלול מעגלי דורש: נקודת השחרור היא הפריגיאום של מסלול כמעט מעגלי ($e_0 \approx 0.037$, אפוגיאוּם ב-18,830 ק"מ). אילו השתחרר על הקו המשווני בקו הרוחב הזה, הוא היה נע לאט מדי למעגל: מסלולו היה אקסצנטרי ($e_0 = \sin^2 \lambda = 0.1464$), הוא היה משתחרר בנקודה הרחוקה ביותר שלו, והגאות של כדור הארץ הייתה מושכת אותו בתחילה פנימה. מעבר לקו כדור הארץ מסתובב מהר יותר מן הקפת הירח, הבליטה הגאותית שהירח מעורר על כדור הארץ נישאת לפניו, ומשיכתה מושכת את הירח קדימה לאורך מסלולו, כך שהמסלול גדל: הגאות דוחפת החוצה מן הרגע הראשון. הירח מתרחק ממסלולו הראשון (מאמר 4, B.2§). אחרי השחרור הסיבוב העצמי שלו עוקב אחרי מסלולו: כ-6.2 שעות בשחרור, 14 שעות ב-30,000 ק"מ, 41 שעות ב-60,000 ק"מ; הבליטה הקטנה שהסיבוב והגאות מעוררים על הגוף הקשיח, יחס צירים של 1.03 ב-30,000 ק"מ, דועכת ל-1.00 ב-60,000 ק"מ (מאמר 7, טבלת הסביבה, על פי מאמר 4).

הנטייה דועכת. כשהגאות נושאת אותו החוצה, הנטייה יורדת. החוק המצומצם של מאמר 4, $\tan i \propto a^{-1/2}$, לוקח את 22.5° של השחרור אל

$$5.145^\circ \text{ at today's distance} = 5.145^\circ \text{ observed}$$

כלומר 5.145° במרחק של היום, שווה ל- 5.145° שנצפו (מאמר 4, D.1§). מ- 25° אותו חוק נותן 5.788° ; קו הרוחב שמחזיר את הזווית הנצפית הוא 22.5° עצמו. החוק הוא חוק מצומצם: הוא אינו מבצע אינטגרציה של המסלול דרך המעבר של מישור Laplace — המרחק שבו הסיבוב האיטי של המסלול עובר מהיותו נקבע בידי הבליטה של כדור הארץ להיותו נקבע בידי השמש — או דרך מצב Cassini, ואלה רשומים במאמר 4 כדרישות.

הקצב. קצב ההתרחקות יורד בתלילות רבה עם המרחק, כמו $a^{-11/2}$, משום שהבליטה הגאותית נחלשת במהירות ככל שהירח מתרחק; כמעט כל זמן המסע עובר בחלקו האיטי והמאוחר. היום הירח מתרחק בכ-3.8 ס"מ בשנה, במרחק 384,400 ק"מ. פיזור אנרגיה קבוע אחד אינו יכול לתת גם את הקצב של היום וגם את גיל המערכת: הערך ששחזר 3.8 ס"מ בשנה מגיע למרחק הנוכחי בתוך כ-1.6 מיליארד שנה; הערך שממלא את

3.87 מיליארד השנים מאז השחרור ($Q \approx 29$) נותן קצב נוכחי של כ-1.5 ס"מ בשנה, קטן פי שניים וחצי, והערך שממלא 4.5 מיליארד שנה ($Q = 33.8$) — קטן פי שלושה. פיזור האנרגיה של כדור הארץ היה חייב להשתנות, וזה מה שמודלים מפורטים של הגאות מוצאים (מאמר 4, D.3§).

מה יש לנו עכשיו: מסלול הנטוי בשחרור בקו הרוחב שממנו הירח יצא, 22.5° , כמעט מעגלי, מתרחק מן ההתחלה, שהחוק המצומצם מביא ל- 5.145° במרחק של היום, הערך הנצפה.

B.8 היום — מה שנראה על הירח ועל כדור הארץ

התהליך משאיר ירח וכדור ארץ שאמורים להיראות באופן מסוים, והם אכן נראים כך (מאמר 11).

על הירח.

- החומר של כדור הארץ. איזוטופי החמצן של הירח מתאימים לאלה של כדור הארץ עד 5 ± 1 ppm (חלקים למיליון): המעטפת שלו היא המעטפת של כדור הארץ, שהלחץ הרים ושנישאה לאורך האגס (מאמר 11, R1; מאמר 3, C.10§).
- ליבה קטנה. הליבה הסייסמית מגיעה לרדיוס של כ-330 ק"מ, כ-1.4% ממסת הירח: ההזנה נשאה סליקט עם מעט מתכת, משום שהברזל עדיין שקע והאגס החזיר למטה את רוב מה שעלה אליו (מאמר 11, R2).
- צד רחוק עבה. הקרום של הצד הרחוק עבה מזה של הצד הקרוב בכ-8–10 ק"מ — כ-10 ק"מ בין מרכז הצד הקרוב לצד הרחוק, כ-8 ק"מ בממוצעים של חצאי הכדור. הצד הרחוק הוא הכיפה העליונה, שנבנתה שכבה על שכבה מן הקליפה של כדור הארץ ומן החומר החוזר; הצד הקרוב הוא הבסיס, שנשא רק את הסיאל שעליו ישב, ומעל המגע איבד אפילו אותו לחום. לקרום של 55 ק"מ בצד הרחוק, חצי הכדור הרחוק מכיל 2.6×10^{21} ק"ג של קרום לעומת 2.85×10^{21} ק"ג של קליפה על הכיפה: השניים מתאימים בכ-10%, בלי שום פרמטר שכוון ביניהם (מאמר 11, B.3§, תוקן 15.10.2026). הקרום של הצד הרחוק אמור להיעשות עשיר יותר בברזל עם העומק, משום ששכבותיו העמוקות נוצרו מוקדם יותר ופחות ממוינות (מאמר 3, B.7§).
- מרכז המסה. מרכז המסה של הירח נמצא כ-2 ק"מ לעבר כדור הארץ ממרכז הצורה שלו; קרום קל שעבה יותר בצד הרחוק מזיז אותו לעבר הצד הקרוב, ובדוגמה של מאמר 11 ההיסט הוא 1.24–3.11 ק"מ לניגודי הצפיפות שנבדקו (מאמר 11, R7).
- פנים אחד אל כדור הארץ, הצד שהיה הבסיס של הגוף שעל הקצה (מאמר 11, R4).
- הימות. ים הוא פתח מעל כיפת הזנה. מתוך 34 הימות של הקטלוג של מאמר 5 (נספח A), 33 יושבים על כיפה של שדה הכבידה — תוצאה שאף מיקום אקראי של 34 נקודות לא הגיע אליה ב-20,000 ניסיונות — ומתוך 73 כיפות כאלה, 44 נמצאות מתחת לרמה בהירה, 36 מהן בצד הרחוק: פתחים קבורים, שפעלו ואחר כך כוסו, יחד עם המכתשים של זמנם, בשכבות שבנו את היבשה סביבם (מאמר 5, חלק D). כיפת הצד הקרוב שהייתה המגע מכילה את הימות הגדולים; הפתחים שדרכם עברה ההזנה הם האגנים הצפופים בעלי הכבידה הגבוהה, ומאמר 5 בוחן אילו מהם זרקו חומר החוצה ואילו רק נשארו אותו מתחת לכיסוי. מבחן הקרום של מאמר 5 השתמש ב-36 הפתחים שסימן המחבר תחילה, שהקטלוג שומר 34 מהם (עם נקודות 35, Copernicus H, 36-I, Sinus Aestuum); שתי הספירות מוחזקות שם בנפרד.
- הקטבים הצפופים. 0.05 ± 1.20 בספירה נקייה, ועולה עם גודל המכתש ל-1.53: התיעוד הכתוב של ההתעגלות פנימה (מאמר 7).
- South Pole–Aitken. המרכז הדל במכתשים — 0.51 מן הצפיפות שמחוץ לשפה ממש — המעטפת המופחתת שמתחתיו, טבעת הקרום המעובה שהחליקה מן הכיפה, ומרכז הכיפה 24–29° מדרום לשתי היציאות, Serenitatis-I Imbrium (מאמר 8).
- המכתשים. כמעט כולם, כ-99%, מחומר ארצי שחזר; העתיקים ביותר נוצרו על כדור הארץ לפני שהירח היה גוף; הקטנים האחרונים נזרקו מכדור הארץ אחרי השחרור, פי 1.19 יותר בצד הקרוב (מאמר 6).

על כדור הארץ.

- ה-LLVP של האוקיינוס השקט מתחת לבסיס האגס ליד Kiritimatı, איטי בכל חמשת המודלים שנבדקו (מאמר 3, §E.4).
 - הפסים של צפון האוקיינוס השקט, הדופן המובילה של האגס, מקופלת: 9,360 ק"מ לעומת אגס של 9,680–9,800 ק"מ, וקו המשווה שלהם נטוי ב-10° לפחות לזה של היום (מאמר 9).
 - טביעת הרגל של הקצה בין שתי כפיפות של הפסים, ברוחב 3,360 ק"מ, שמרכזה ב-9.3° צפון 169.3° מזרח, כ-3,760 ק"מ ממערב לבסיס; שתי שרשראות רכסי השפכטל משני צדיה (מאמר 9).
 - הקשתות של מערב האוקיינוס השקט ואינדונזיה, גב האגס, במרחק 8,100–10,300 ק"מ מן הבסיס (מאמר 9).
- בשמיים.** מסלול ב-384,400 ק"מ, נטוי 5.145° למישור המילקה, המתרחק בכ-3.8 ס"מ בשנה (מאמר 4, מצב היעד).
- כל אחד מאלה הוא דרישה של מאמר 11 או מדידה של מאמרים 5–9, וכל אחד מהם מרוכז עם מצבו בחלק D, ועם הדרישות בחלק E.

B.9 השלבים בטבלה אחת

הטבלה מרכזת את חלק B במקום אחד: לכל שלב, מה קורה, המספר שנושא אותו, והמאמר שמחשב או מודד אותו. הצבע מעמיק מכדור הארץ החם ועד השחרור, ככל שהגוף נאסף, נעשה צפוף ומתעגל, והופך לאדום אחרי השחרור, כשהסיפור עובר בחזרה אל כדור הארץ ואל הירח החופשי.

שלב	מה קורה	המספר	מאמר
0 לפני הבליטה	כדור ארץ חם ומורחב, עדיין כמעט אחיד בפנימו, הברזל שלו שוקע; אזור הזנה אחד מתחת לאזור אחד של פני השטח	5.5 שעות; $r_c = 15\,818$ ק"מ; 5,020 מ"ש; 150 ג"יה-פסקל במקור; התכה $3\,864 < \text{ק"ג/מ"ק}$	2, 3
1 הבליטה	בליטה אחת שהלחץ מרים; פתחים בקליפה השטוחה זורקים חומר שחוזר ויוצר מכתשים על הקליפה של כדור הארץ	5 ק"מ/ש' החוצה ובחזרה; 28 דקות; ~1,000 ק"מ מערבה; 46 ג"יה-פסקל	3, 6
2 הכיפה	גוף על קצה רחב, כיפה עליונה מעל כיפה תחתונה; קליפת הסיאל הקשיחה עולה איתו כעורו, ונושאת מכתשים	מגע 6,000 ק"מ; כיפה 3,650 ק"מ; 1,300 ק"ג/מ"ק; כבידה עצמית/גאות 0.11	3, 11
3 האגס	אגס שמוחזק בכבידה של כדור הארץ כחלק ממנו, בסיסו ליד Kiritimatı מעל ה-LLVP של האוקיינוס השקט; נוטה אחורה מערבה וצפונה; טביעת הרגל של הקצה בין כפיפות הפסים	בסיס 9,000–11,000 ק"מ; 9–12 מסות ירח; קצה 6,000 → 3,000 ק"מ; טביעת רגל 3,360 ק"מ, כ-3,760 ק"מ מערבה	3, 9

3, 7, 8	$0^{\circ}-31^{\circ}, 31^{\circ}-70^{\circ}, 70^{\circ}-180^{\circ}$; a/c 1.69 ב-12,994 ק"מ; קטבים 0.05 ± 1.20 , עד 1.53; כיפת SPA 17–21° → 24–29°	התעגלות החוצה לפי כלל החלקים; פחיסות והמכתשים הגדולים ביותר; התעגלות פנימה שמצפיפה את הקטבים; הברנר מתחת לצד הרחוק, יציאות Serenitatis-I Imbrium, נחלש ככל שהמעברים הצרו	4 ההתעגלות
2, 3, 4, 5, 8	5.77 שעות; 16,399 ק"מ (17,287 ב-22.5°; שחרור ב-17,496); 2,600 ק"ג/מ"ק, 1,890 ק"מ; פי 1.007 מן התנע הזוויתי של היום; Ga 3.873	מרכז המסה מגיע לקו והגוף משחרר כ-210 ק"מ מעבר לו; הירח העגול והקשיח יוצא במסלול כמעט מעגלי; המגע של 3,000 ק"מ מתקלף; הימות של הצד הקרוב מנותקים מן הלחץ של כדור הארץ וקופאים לאט אחר כך	5 השחרור
3, 6, 9	פסים 9,360 ק"מ מול אגס 9,800–9,680 ק"מ; קו המשווה של הפסים $\leq 10^{\circ}$; מכתשים טריים בצד הקרוב 1.19	נבלע בכדור הארץ: החלק הכבד אל ה-LLVP, הדופן המובילה אל הפסים, הגב אל הקשתות; כדור הארץ ממשיך לזרוק חומר	6 גורל האגס
4	$i_0 = 22.5^{\circ} \rightarrow 5.145^{\circ} (=$ הנצפה); $\dot{a} \propto a^{-11/2}$	נטייה השווה לקו הרוחב של השחרור; מסלול כמעט מעגלי; הגאות דוחפת החוצה מן ההתחלה; הנטייה דועכת	7 ההתרחקות
5–9, 11	5 ± 1 ppm; ליבה ~330 ק"מ; צד רחוק 10–8+ ק"מ; מרכז מסה 2~ ק"מ; 3,344 ק"ג/מ"ק	הירח: חומר של כדור הארץ, ליבה קטנה, צד רחוק עבה, 34 ימות, קטבים צפופים, SPA. כדור הארץ: LLVP, פסים, קשתות	8 היום

טבלה B.5. התהליך בשלבים 0–8. הכחול הכהה מעמיק לאורך הבנייה, ככל שהגוף נאסף, נעשה צפוף ומתעגל; האדום מסמן את מה שבא אחרי השחרור.

קראו את הטבלה מלמעלה למטה, והמודל מסופר שוב בתשע שורות. המחצית הימנית היא הסיפור; המחצית השמאלית היא מה שהופך אותו למודל ולא לסיפור: מספר לכל שלב, מחושב או נמדד, והמאמר שבו הקורא יכול לבדוק אותו. חלק C מציג עכשיו את המאמרים האלה אחד אחד.

חלק C — המאמרים, אחד אחד

חלק B סיפר את התהליך כסיפור אחד. חלק זה מציג את עשרת המאמרים שעליהם הסיפור הזה נשען, לפי סדר הסדרה. כל מאמר מוצג באותה דרך: תחילה הטענה שלו, בתיבה של שניים או שלושה משפטים; אחר כך כל אחד מחלקיו — כל חלק וכל נספח — בפסקה אחת, שבראשה הכותרת של החלק עצמו ובה המספרים המרכזיים שלו. קורא שרוצה רק את צורת הסדרה יכול לקרוא את הטענות ולעצור שם; קורא שרוצה לדעת מה מאמר מחשב בפועל, והיכן לחפש זאת בתוכו, ממשיך אל חלקיו. המספרים הם המספרים של המאמרים עצמם, וכל פסקה מציינת את הסעיף שבו הם נמצאים.

C.2 מאמר 2 — LEF Mechanism in Principle

הטענה

החומר של הירח עזב את כדור הארץ כשהוא עדיין מסתובב איתו, ושוחרר במקום שבו המהירות שכבר הייתה לו הייתה המהירות שמסלול חופשי דורש: רדיוס הקורטציה, 15,818 ק"מ לגוף אם שיומו 5.5 שעות, וכ-16,400 ק"מ ביום של 5.77 שעות בזמן השחרור. כשמאזן התנע הזוויתי מחושב שם, ולא על פני כדור הארץ, הוא נסגר בפי 1.007 מן הערך של היום (גרסה מוקדמת נתנה 1.008), ואילו מסלול הביקוע הקלאסי דורש פי 2.74; ההתנגדות שסגרה את הדלת בפני מוצא ארצי מאז Darwin אינה חלה על המסלול הזה.

חלק פתיחה — הסביבה, הרעיון והמבוא. לפני כל חישוב קובע המאמר את המצב שאליו שייך כל מספר, כדי ששום ערך לא יועבר מרגע אחד לרגע אחר. גוף האם הוא כדור הארץ והירח של היום יחד, 6.0455×10^{24} ק"ג, ומסת הירח, 7.35×10^{22} ק"ג, נספרת בו פעם אחת — בתוך גוף האם לפני ההעברה, ובירח אחריה — כך שלכדור הארץ נותרים 5.972×10^{24} ק"ג. גוף האם חם ומורחב (רדיוס נפחי של 6,517 ק"מ, התפשטות מאומצת של 120 ק"מ), אחיד במהותו משום שהתארגנות הליבה שלו רק החלה, והוא מסתובב פעם אחת ב-5.5 שעות. כספרואיד מקלורן (Maclaurin) — צורת שיווי המשקל הפחוסה של נזל אחיד מסתובב — הרדיוס המשווני שלו הוא כ-6,721 ק"מ. המבוא מפריד בין שתי שאלות שהיו כרוכות זו בזו במשך מאה וחמישים שנה: המהירות שהחומר צריך ברגע השחרור, ומאזן התנע הזוויתי הדרוש כדי להגיע למצב הזה. היום של 5.5 שעות אינו נבחר: זהו התנע הזוויתי של היום, $3.44 \times 10^{34} \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-1}$, כשהוא מוחזר אל הסיבוב של כדור ארץ חם שאינו מובחן לשכבות (5.54 שעות), ועוד כ-1% שגאות השמש הוציאו מאז.

חלק A — הבעיות שלפנינו. חלק A מונה, אחד אחד, את התנאים שגוף הבנוי מן החומר של כדור הארץ עצמו חייב לעמוד בהם כדי להגיע למסלול שלם. הראשון הוא פער המהירות שסיים את הביקוע הקלאסי: בקו המשווה של גוף אם שיומו 5.5 שעות הקרקע נעה ב-2,133 מ"ש, מסלול חופשי שם דורש 7,701 מ"ש, וחומר שמשוחרר מפני השטח נע באליפסה שחצי הציר הגדול שלה 3,495 ק"מ, והיא חוזרת אל תוך גוף האם (A.1§). הפער נסגר עם המרחק, משום שהמהירות שהסיבוב נושא גדלה כלפי חוץ ואילו מהירות המסלול קטנה, והשתיים שוות ברדיוס הקורטציה, $R_{\text{sync}} = (GM/\omega^2)^{1/3}$ — יחס המסלול הסינכרוני של המכניקה הסטנדרטית, אותו יחס שממקם את הלוויינים הגיאוסטציונריים, כשהוא מחושב כאן במקום חדש (A.2, §A.5§). האגס מגשר בין כדור הארץ לבין הקו הזה: גבעה שבסיסה ברוחב של כ-9,000 ק"מ ובקצה מגע של 3,000 ק"מ עם הירח, המגשרת על כ-7,800 ק"מ מפני כדור הארץ עד הירח על הקו המשווני (כ-8,700 ק"מ לשחרור ב-22.5°, מאמר 3), ונמצאת כולה בתוך הקו (A.3§). שני תהליכים קובעים את אורך היום בשחרור: האגס המתארך נושא סיבוב כלפי חוץ, ולבדו היה מאריך את היום מ-5.50 ל-6.44 שעות ודוחף את הקו ל-17,569 ק"מ; ואילו הברזל ששוקע אל הליבה

מאיץ את כדור הארץ, כמו מחליקה שמקרבת את זרועותיה. עם ליבה צפופה פי שניים מן המעטפת ($D = 2$) הוא מקצר את היום ב-0.67 שעות (A.4§). אחר כך נבנה המאזן: גוף אם אחיד מחזיק $L_0 \approx 3.466 \times 10^{34} \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-1}$, 0.7% מעל סכום הסיבוב והמסלול של היום (1.5%–2.5% בחיבור וקטורי, בזוויות שנבדקו; גרסה מוקדמת נתנה 1.5%–2.6%), וההעברה מוסרת כשישית ממנו לחומר, 15.6% בחישוב הבסיסי (A.6§). העודף מחייב גוף אם אחיד במהותו בהתחלה, $k \gtrsim 0.397$, לעומת כ-0.33 לכדור הארץ של היום עם הליבה שלו. בנקודת ההתפצלות הקלאסית של יעקובי (Jacobi) היה גוף האם צריך יום של 2.73 שעות ופי 2.74 מן התנע הזוויתי של היום; ה"פי ארבעה" המוכר (4.08) שייך לנקודה אחרת על אותה סדרה (A.6.5§). חלק A נחתם בגבולות רוש לגוף בצפיפות 2,600 ק"ג/מ"ק — 19,971 ק"מ לגוף נוזלי, 10,314 ק"מ לגוף ששומר על צורתו (A.7§); גרסה מוקדמת נתנה 10,313 ק"מ, אותו ערך בתחום העיגול) — ובקו פרשת המים של הגאות: מחוץ לקו הקורטוציה לוויין נדחף כלפי חוץ, ובתוכו הוא נמשך פנימה, כפי ש-Deimos ו-Phobos מראים היום במאדים (A.8§).

חלק B — כיצד הבעיות נפתרות. חישוב אחד עונה על כל הבעיות של חלק A עם מערכת מספרים אחת (B.1§). מן ההתחלה של 5.5 שעות, האגס והליבה המתמרכזת יחד נותנים יום ארצי של 5.77 שעות בשחרור; קו הקורטוציה נמצא אז ב-16,331 ק"מ לחלקיק בוחן, וב-16,399 ק"מ, כ-16,400 ק"מ, כשמסת הירח עצמו נכללת — כפי 2.6 מרדיוס כדור הארץ של היום. הירח מתחיל להיפרד כשמרכז המסה שלו מגיע אל הקו הזה, ונתלש מעט אחריו, כ-210 ק"מ מעבר לקו; ברדיוס של 1,890 ק"מ הצד הקרוב שלו נמצא ב-14,509 ק"מ, והמשווה של כדור הארץ, שנפחם ל-6,701 ק"מ בסיבוב האיטי יותר, נמצא כ-7,800 ק"מ מתחתיו. שם הסיבוב נותן לירח בדיוק את מהירות המסלול, כ-4,960 מ"ש', כך שלא נותר פער ואין צורך בדחיפה (B.2§). בשחרור המסלול של הירח מחזיק 5.9×10^{33} (17%) — התנע הזוויתי המסלולי של הזוג סביב מרכזם המשותף, עם המסה המצומצמת; 6.0×10^{33} כשמונים את מסת הירח המלאה סביב מרכז כדור הארץ — והסיבוב של כדור הארץ 2.88×10^{34} ; המערכת מחזיקה פי 1.007 מן התנע הזוויתי של היום, ומקדם מומנט ההתמד של כדור הארץ הנגזר מכך, $k = 0.355$, מתאים ל-0.360 של כדור ארץ דו-שכבתי עם $q = 0.55$ ו- $D = 2$ (B.6§). אין צורך בפגיעת ענק ולא בהוצאה מאוחרת של תנע זוויתי. בשחרור הירח נמצא הרחק מעבר לגבול רוש הקשיח (9,484–12,994 ק"מ לצפיפויות של 1,300–3,344 ק"ג/מ"ק) ובתוך גבול רוש הנוזלי; הוא מוחזק בידי הקליפה החיצונית הקשיחה שלו, שבקשיחות של 10 ג'יגה-פסקל ומעלה שומרת על יחס צירים של 1.04 לכל היותר — הגוף עגול, משום שהפחיסות וההתעגלות שלו הושלמו בעודו מחובר (B.7§; מאמר 7, הקטבים (The Poles)). הניתוק נושא את מרכזו מעט מעבר לקו, שם הגאות שהוא מעורר על כדור הארץ, המסתובב מהר יותר, מקדימה אותו ומושכת אותו כלפי חוץ כבר מן ההתחלה (B.8§).

חלק C — סיכום. טבלה אחת מצמידה כל בעיה של חלק A לתשובה שלה בחלק B: המהירות באה מן הסיבוב, ועל הקו לא נותר פער; האגס מגשר אל הקו, והירח עוזב שלם; היום של 5.77 שעות בא משני התהליכים יחד; מרכז המסה משתחרר בכ-16,400 ק"מ; התנע הזוויתי נסגר בפי 1.007 מזה של היום ומתאים למבנה הליבה; הגוף קשיח ונמצא הרחק מעבר לגבול רוש הקשיח; והוא מתרחק מרגע השחרור.

חלק D — טענות, מבחנים וחידוש. המאמר מרכז את הדרישות והטענות שלו במקום אחד. שלוש דרישות עומדות בראש הרשימה: ליבה שמתמרכזת בזמן ההעברה ($D \approx 2$); גוף קשיח בשחרור ($\mu \geq 10$ ג'יגה-פסקל); ואגס רציף מכדור הארץ אל מגע של 3,000 ק"מ, בלי שארית של צוואר שהירח נושא איתו. אחריהן באות חמש טענות מרכזיות, כל אחת עם מעמדה והמבחן שלה — קורטוציה (יישום של פיזיקה סטנדרטית), סגירת המאזן (מבחן עקביות), רגישות למבנה (תוצאה מחושבת), התיקון שאינו משווני (תיקון גאומטרי) ושרידות (דרישה פתוחה שמועברת למאמרים הבאים). הערכים המאומצים מובאים עם החלונות שלהם: יום של 5.5 שעות בתוך 4.90–5.54 שעות בהתפשטות של 120 ק"מ; התפשטות של 98–520 ק"מ, רדיוס נפחי של 6,495 ק"מ לפחות; גוף אם עם $k \geq 0.397$ בתחילת ההעברה, לעומת כ-0.33 לכדור הארץ של היום; ושחרור מעבר לקו, שכן גוף שמשחרר בתוך הקו נע בספירלה פנימה. החידוש מנוסח בפשטות: החוקים ישנים; מה שחדש הוא המקום שבו תנאי המהירות מחושב, והחישוב המשותף של מסה, צורה וסיבוב בהעברה מחוברת אחת.

חלק E — מסקנות. גוף בגודל הירח יכול להגיע למסלול מן החומר של כדור הארץ עצמו, בלי התנגשות מבחוח. כשרשרת אחת: הסיבוב של כדור הארץ נושא את החומר כלפי חוץ; הקו שבו המהירות הנישאת שווה למהירות המסלול קובע היכן הירח עוזב; האיזון בין האגס לליבה קובע היכן נמצא הקו הזה; והתנע הזוויתי שכדור הארץ התחיל איתו מספיק, עם עודף של כ-1% שהשמש תוציא מאוחר יותר. המסקנות הקודמות נשמרות עם ערכי הייחוס שלהן: 15,818 ק"מ הוא הקו לפני ההעברה, וכ-16,400 ק"מ הוא הקו אחרי שהאגס והליבה פעלו; החומר מקבל 15.6% מן המאזן בחישוב הבסיסי ו-16.5% בפתרון המצומד; כ-17.7% הוא החלק המסלולי הסופי במצב המצומד עם האגס בלבד ($D = 1$), ואילו בשחרור עם $D = 2$ המסלול של הירח מחזיק כ-17.0% (גרסה מוקדמת הציגה את ה-17.7% כחלק בסוף). העבודה העתידית מונה שישה חישובים לקבוצות אחרות: פתרון מקלורן מרובד של הליבה המתמרכזת, הפיזור (הדיסיפציה) של כדור הארץ הקדום מן היום של 5.77 שעות, ערך של ההתפשטות התרמית ממשוואת מצב, אינטגרציה גאותית של תחילת ההתרחקות, חישוב שרידות ויסקו-אלסטי ל- 10^1 – 10^3 השנים שבהן הגוף שווה בתוך גבול רוש הנוזלי, וחישוב מודרני של סדרת יעקובי הקלאסית.

נספח A — גזירת הקורוטציה, הגדרות וקבועים. הנספח קובע את ההגדרות שעליהן נשען כל מספר. הוא מפריד בין המסה ההתחלתית הכוללת לבין המסה הסופית של כדור הארץ, ובין רדיוס הנמדד ממרכז כדור הארץ לבין רדיוס הנמדד ממרכז המסה של הזוג; במקרה של שני גופים הפרמטר הכבידתי הוא $G(M_\oplus + m)$. הערך 15,818 ק"מ שייך להגדרה אחת מוצהרת (המסה הסופית של כדור הארץ, קירוב חלקיק הבוחן); הגדרה אחרת נותנת מספר אחר, לא את אותו מספר בתווית חדשה.

נספח B — הגאומטריה המסתובבת ומאזן התנע הזוויתי המצומד. הנספח גוזר את גוף האם צעד אחר צעד: המסה, 6.0455×10^{24} ק"ג; הגודל, רדיוס של כ-6,397 ק"מ בצפיפות קרה, שהתפשט ב-120 ק"מ ל-6,517 ק"מ בצפיפות של כ-5,214 ק"ג/מ"ק; הצורה, ממשוואת מקלורן, $e_0 \simeq 0.4107$, $a_0 \simeq 6,721$ ק"מ, $c_0 \simeq 6,128$ ק"מ; והמאזן, $I_0 \simeq 1.092 \times 10^{38} \text{ kg m}^2$ ו- $L_0 \simeq 3.466 \times 10^{34}$. סריקת ההתפשטות שלו מראה מאין בא הטווח המותר: בלי התפשטות המאזן חסר ב-3.3% לעומת זה של היום, ב-98 ק"מ הוא שווה לו, ב-120 ק"מ הוא עולה עליו ב-0.7%, וב-520 ק"מ ב-15%, הגבול המאומץ של מה שהשמש יכולה להוציא מאוחר יותר.

נספח C — חישוב ההתמיינות ומבחני הרגישות. החישוב הדו-שכבתי שמאחורי ההפרש משווה מצבי קצה, לא מסלול בזמן: שכבה פנימית ושכבה חיצונית המסתובבות יחד, כל גבול הוא משטח של פוטנציאל אפקטיבי שווה, ומומנט ההתמד מחושב מן הצפיפות ומן הצורה. עבור $q = 0.55$ היום הסופי יורד מ-6.438 ל-5.274 שעות, והקו נע פנימה מ-17,569 ל-15,382 ק"מ כש- D עולה מ-1 ל-3; $D = 2$ נותן 5.77 שעות ו-16,331 ק"מ, וב- $D = 2.5$ הליבה מבטלת כמעט בדיוק את ההאטה שהאגס גורם. שחרור צורות הגבולות משנה את הרדיוס בכ-2.5 ק"מ לכל היותר; התוצאות אמינות ברמת הקילומטר.

נספח D — התיקון הווקטורי למאזן וההעברה למאמר 4. מחוץ לקו המשווה, התנע הזוויתי המסלולי של הירח והסיבוב של כדור הארץ כבר אינם מכוונים לאורך ציר אחד, והם מתחברים כחצים: $L_0^2 = S^2 + H^2 + 2SH \cos \lambda$. במבחן הרגישות של 25° השחרור המתוקן נמצא בכ-17,177 ק"מ (חלקיק בוחן) או ב-17,240 ק"מ (שתי מסות), כשהציר של כדור הארץ במרחק 3.85° או 3.84° מן הסך הכולל; הערך הקודם, 4.48° , הוצא מן החשבון משום שעברב וקטורים שבוטאו במערכות ייחוס שונות. קו הרחוב המאומץ, 22.5° , מחושב מחדש במאמר 4, המסלול (The Orbit).

נספח E — חישובי רוש והנחות השרידות. הנספח נותן את הרקע לשני גבולות רוש ומדד ראשון לעומס הגאותי. ב-15,818 ק"מ המתיחה הגאותית לרוחב גוף של 1,890 ק"מ היא כ-0.381 מ"ש², לעומת כבידה על פני השטח של 1.373 מ"ש², יחס של 0.277: הכבידה העצמית מנצחת. כשהעומס מתורגם למאמץ, 1.87×10^9 פסקל, ולזמן, הוא היה משנה בחצי את צורתו של גוף בצמיגות 10^{19} Pa s בתוך כ-85 שנה; הדבר נשמר כתלות פרמטרית, לא כזמן התפרקות, והעיוות של הגוף המחובר והמשוחרר הוא דרישת שרידות מוצהרת.

נספח F — עבודות קודמות, חידוש ותיעוד המבחנים. רכיב אחר רכיב, הנספח מפריד בין פיזיקה סטנדרטית (מהירות מעגלית וקורוטציה, צורות מקלורן ויעקובי, הסימן של העברת התנע בגאות, גבולות רוש) לבין היישום של המאמר עצמו, הצירוף של מסה, צורה ומאזן בתרחיש המחובר. הוא מונה את הבדיקות הביבליוגרפיות שעוד חייבים לבצע לפני ההגשה, ומתעד שהיעדר פתרון שרידות מסומן כפתוח, ואינו נספר כמבחן שעבר.

נספח G — טבלת הסביבה הפיזיקלית המחייבת את החישובים. הסביבה המלאה, שורות E01–E70, מתעדת גודל אחר גודל מה מאומץ, מה מחושב, מה משוחרר, מה פתוח ומה אילוף של ההווה, בכל אחד משלושה מצבים: לפני חלוקת המסה, בזמן הבנייה וסמוך לשחרור. שני עדכונים מאוחרים של המחבר מוסיפים את החומרים הנדיפים — מלאי קדום גדול מזה של היום, מומס, בבועות או באדים לפי הלחץ והטמפרטורה — ואת מחזור הקירור, שבו חומר עשיר בנדיפים עולה, מתקרר וחוזר, כמו סיר מרק על כיריים. ציר זמן מחייב מסדר את השלבים בלי להמציא תאריכים: ככל שהגוף מתקלף, המעברים שמובילים אליו את הלחץ של כדור הארץ נעשים צרים; ברגע הניתוק הלחץ הזה מפסיק להגיע לירח, ואיתו נפסקות הפליטות כלפי חוץ; ההתעגלות מושלמת לפני השחרור.

C.3 מאמר 3 — LEF Mechanism in Practice

הטענה

הירח הוזן מבפנים ועלה מבחוץ — גוף אחד, שנבנה בשתי דרכים בבת אחת. מבפנים, הלחץ של גוף האם עצמו, 150.26 ג'יגה-פסקל במקור, מרים התכה מוקצפת אל קו הקורוטציה עם עודף של 10.49 ג'יגה-פסקל; מבחוץ, הקליפה החיצונית של כדור הארץ עלתה עם הגוף כעור של הכיפה העליונה שלו והפכה לקרום שלו. מתחתיו נמשך כדור הארץ לאגס, שהוא חלק מכדור הארץ ומוחזק בכבידה של כדור הארץ, והגוף שעל קצהו שוחרר, עגול, מעט אחרי שמרכז המסה שלו הגיע אל קו הקורוטציה, כ-210 ק"מ מעבר לו; ההתמיינות אספה אחר כך את האגס בחזרה אל כדור הארץ.

חלק פתיחה — הסביבה, הרעיון והמבוא. המאמר מטפל בבנייה כולה כתהליך אחד בגוף אחד, בסביבה של מאמר 2: גוף אם של 6.0455×10^{24} ק"ג ו-6,517 ק"מ, יום של 5.5 שעות בהתחלה ו-5.77 שעות בשחרור, והקו ב-16,399 ק"מ על המשווה וב-17,287 ק"מ בקו רוחב 22.5° . חלון התרחיש הוא כ-600 מיליון שנה, מתחילת הבליטה ועד השחרור לפני 3.873 מיליארד שנה — בערך 400 מיליון שנה לבליטה ולאגס, כ-100 מיליון שנה לפחיסות וכ-100 מיליון שנה עד השחרור — ו-100 מיליון שנה נשמרים כמקרה רגישות. התמונה היא בלון שמתמלא מצינור שמתחתיו, בעוד העור שלו הוא פני הקרקע המתוחים שעליה שכב: המילוי הוא ההזנה של חומר עמוק וחם; העור הוא הקליפה הסיאלית של כדור הארץ — סיאל הוא השכבה העליונה הקלה, העשירה בצורן ובאלומיניום, השוכבת על הסימה הצפופה יותר, העשירה במגנזיום. אף אחד משני המקורות לבדו אינו יוצר את הירח. הקורוטציה קושרת בין הסיבוב לבין מהירות המסלול, אבל אינה מרימה חומר ואינה קובעת את רגע הניתוק; לכן שואל המאמר איזה לחץ, איזה מאזן מסה ואנרגיה, איזה מבנה זרימה ואיזה חיבור הבנייה דורשת.

חלק A — מבפנים: בעיית ההובלה ומאזן החומר. הצעד הראשון הוא חשבון שבו לכל קילוגרם יש מקום אחד: מסת גוף האם מחולקת בכל רגע בין כדור הארץ, הגוף הגדל, החומר שבדרך ומה שנמלט, וחומר שנפלט ונוחת בחזרה מופחת ומתווסף מחדש (A.1§). הסיבוב לבדו אינו יכול לבצע את ההרמה: לגוף במסת הירח הנוגע בגוף האם, 8,991 ק"מ ממרכזו, המשיכה של כדור הארץ היא 4.93 מ"ש², והדחיפה כלפי חוץ של סיבוב של 5.5 שעות היא רק 0.905 מ"ש²; כל קילוגרם עדיין שוקל כשתי חמישיות ממשקלו על כדור הארץ של היום (A.2§). המנגנון שנבחן הוא אפוא הזנה רציפה בלחץ, וחלק A כותב את המאזן שהיא חייבת לקיים: לאורך הדרך הלחץ חייב

לשלם את משקל העמוד בשדה המשולב של הכבידה והסיבוב — הלחץ ההידרוסטטי שלו, היחסי לצפיפות החומר — ואת החיכוך של הזרימה שלו (A.3§).

חלק A (המשך) — מקור עמוק, גוף מתפתח וגבולות תרמיים שונים. הזנה שהייתה נודדת הייתה בונה ערמות רבות, לא ירח אחד; המקור הוא אזור מועדף בפנים המתארגן מחדש, אונה (A Lobe), צפונית לקו המשווה, שמזינה את אותו מקום זמן רב, כמו שסיר שמחומם שלא במרכזו ממשיך לרתוח בנקודה אחת (A.4§). המעבר נשמר פתוח בזכות החום של ההזנה ושל הגופים החמים משני צדיו; החום שומר עליו נוזלי, אבל אינו מחזיק את דפנותיו, ואותן חייבת להחזיק הצורה שלו (A.5§). החומרים הנדיפים, במלאי גדול מזה של היום, מומסים בעומק ויוצאים עם ירידת הלחץ, ומקציפים את ההתכה; תפקידם הוא לעשות את החומר העולה קל, לא להעלות את לחץ המקור מעל משקל החומר שמעליו (A.6§). קליפה מוצקה נוצרת מעל הגוף החם במהירות — מטר אחד בכ-1.9 ימים כשפני השטח מקוררים בחוזקה, 50 ק"מ בכ-13.2 מיליון שנה (158 מיליון שנה כשפני השטח חמים) — כך שהחוץ יכול להתקשות בעוד הפנים וההזנה נשארים ניידיים (A.7§). הסדר קבוע: ההזנה, עליית הכיפה והפליטות חופפות. ככל שההתקלפות מתקדמת, המעברים שמובילים את הלחץ של כדור הארץ דרך האגס אל הגוף נעשים צרים: Serenitatis מתקלפת ראשונה ומנותקת מן הלחץ הזה, ואחר כך היא פעילה רק מעט, דרך Imbrium, שנשארת מחוברת. ברגע הניתוק הלחץ של כדור הארץ מפסיק להגיע לירח, ואיתו הלחץ הפנימי של הירח והפליטות; לכן עידן המכתשים מסתיים רק אחרי השחרור (A.8§). אחרי השחרור, טיפות קטנות ובינוניות שכדור הארץ פולט נמשכות אל הירח הקרוב ויוצרות מכתשים קטנים; לסגירת הכיפה החיצונית אין תפקיד, והימות של הצד הרחוק נפסקות כשהקירור מסיים את הלחץ הפנימי.

חלק A (המשך) — האם הלחץ, הקצב והאנרגיה מספיקים? לדחיפה מוצמד מחיר. במרכז גוף האם, משקל החומר שמעליו, שהסיבוב מקל עליו מעט, נותן לחץ מקור של 150.26 ג'יגה-פסקל (A.9§). עמוד של התכה ממרכז גוף האם אל נקודת הקורטציה של גוף האם כולו, 15,882.9 ק"מ, עולה 139.78 ג'יגה-פסקל עבור התכה עמוקה בצפיפות 3,500 ק"ג/מ"ק שמוקצפת ל-1,500 ק"ג/מ"ק מעל פני השטח, ומשאיר 10.49 ג'יגה-פסקל; בצפיפות 4,000 ק"ג/מ"ק העמוד נכשל ב-3.92 ג'יגה-פסקל, והסף הוא התכה עמוקה קלה מכ-3,864 ק"ג/מ"ק — תנאי שהתכה עשירה בנדיפים עומדת בו והתכה יבשה אינה עומדת בו (A.10§). הובלת כל מסת הירח דורשת 2.33×10^7 ק"ג/ש' לאורך 100 מיליון שנה, או 3.88×10^6 ק"ג/ש' לאורך 600 מיליון שנה, והזרימה דרך מעבר גדלה כחזקה הרביעית של הרדיוס שלו (A.11§). הרמת הירח מפני כדור הארץ ל-16,400 ק"מ עולה כ- 1.47×10^{30} ג'אול, פחות מאחוז אחד מאנרגיית הקשר של גוף האם; היא משולמת בידי אותה התפתחות שמניעה את הזרם העולה, שקיעת הברזל (A.12§). המבחן המשותף של לחץ, זרימה ועומס במצב אחד — 22.5° , 5.77° שעות, הצד הרחוק של הגוף על הקו — נותן את התוצאה השלילית החדה של המאמר: צינור דק וחסר מסה אינו יכול לבנות את הירח. המאזן הרדיאלי עובר רק מרדיוס מעבר של כ-1,017 ק"מ, שבו המעבר עצמו כבר מחזיק 0.46 מסות ירח, ויותר עומס צידי בסדר גודל של 10^{22} ניוטון שנוזל במנוחה אינו יכול לשאת. החיבור חייב להיות רחב, חם ומסיבי (A.13§).

חלק B — מבחן: הגוף על קצה האגס. חלק B עוקב אחר העור החיצוני של כדור הארץ לאורך ארבעה שלבים, ומציב כל חלק ממנו על הירח של היום. בשלב השטוח הסיאל שוכב מעל הזנה פעילה, וכבר נושא מכתשים מחומר שנפלט דרך הפתחים שלו, חזר ונחת; אגן האוקיינוס השקט, ששטחו פי 1.4 עד 2.4 משטח הכיפה העליונה המאוחרת, מסמן את האזור שממנו נאספה הקליפה (B.1§). בסיס האגס עמד סמוך ל-Kiritimati (1.9° צפון, 157.5° מערב); האזור ב- 25° צפון, 165° מזרח, שנקרא קודם כמקור, הוא הגב שלו, שנטה מערבה כשהסיבוב גרם לחלק החיצוני לפגר, וצפונה, בעקבות הזנה שעלתה באלכסון ממקור צפונית לקו המשווה. בשלב הביניים הגוף יושב על הקצה הרחב של האגס כמו כדור מעוך על משענת מעוגלת: מגע של 6,000 ק"מ, כיפה תחתונה הצמודה לקצה (3.4×10^{13} מ"ר, 33%) וכיפה עליונה המתנשאת כ-3,650 ק"מ מעל השפה (7.0×10^{13} מ"ר, 67%) — הגובה שבו למסת הירח המלאה יש הצפיפות המוקצפת של 1,300 ק"ג/מ"ק שחלק A דורש: הגוף כולא אז 5.65×10^{19} מ"ק, פי שניים מ- 2.83×10^{19} המ"ק של הכדור בשחרור, והכיפה

העליונה שלו גדולה בערך פי שלושה מחצי הכדור הרחוק של אותו כדור (B.2§). הקליפה כן נודדת: היא עולה עם גוף האגס, ולאט נפרדת ממנו ומחליקה כלפי מעלה אל הקצה, אל הירח — וזו הסיבה שהקצה מתנתק כגוף בפני עצמו; הסיאל גולש כלפי מעלה, בכיוון ההתמיינות החיצונית, והגלישה נעשית קלה תחת כוחות הגזירה בזכות השכבה ה"משומנת" שבין הסיאל לסימה. הטבעת החשופה של החלק התחתון של הגוף מתכווצת, כ-1,500 ק"מ פנימה במשך מיליוני שנים, על ממשק חלש שמתחת לקליפה נוקשה בצמיגות של 10^{23} Pa.s ומעלה — הצמיגות ששומרת על מכתש של 100 ק"מ מלהתרפות במשך 10^7 שנים (B.3§). מכאן כלל התרגום: בהתעגלות החוצה כל חלק שומר על חלקו בפני השטח, כך שהמגע של 3,000 ק"מ (7%) הופך לכיפה בצד הקרוב בגודל של כ-31°, הטבעת המקולפת (26%) לחגורה מ-31° עד 70°, והכיפה העליונה לצד הרחוק (B.4§). את הגבעה ואת המגע אפשר לשרטט על הצד הקרוב של היום: הגבעה מכילה 99% משטח הבזלת הכהה של הצד הקרוב, המגע 66% (חלקי שטח, מאמר 5), ו-Mare Imbrium, הפתח שדרכו ההזנה נכנסה אל הגוף, נמצא בתוך המגע. הפתחים הם משני סוגים — פתחי פליטה על הכתר ועל הצלע, שהשליכו חומר החוצה, וצינורות מכוסים מתחת לכיפה התחתונה, שרק הובילו אותו (B.5§). המכתשים שנוצרו על הקליפה החשופה נדדו איתה ושמרו על גודלם; רובם, והגדולים שבהם, נוצרו בשלב הפחיסות, ובהתעגלות פנימה הקטבים אספו אותם (B.6§). הקרום של הצד הרחוק הוא שכבות רבות של סיל דחוס, שנדד אל הקצה בכוחות הסיבוב, ושל חומר שחזר שוב ושוב, ותכולת הברזל שלו עולה עם העומק; כשלוקחים אותו ב-55 ק"מ וב-2,550 ק"ג/מ"ק על פני חצי הכדור הרחוק הוא כ- 2.6×10^{21} ק"ג, 3.5% ממסת הירח, ויחד עם הקרום של הצד הקרוב, כ- 1.5×10^{21} ק"ג, הוא מגיע ל- 4.1×10^{21} ק"ג, כ-5.6% — בתוך ה-4–6% ש-GRAIL נותנת לקרום כולו; 94–96% הנותרים הם החומר העמוק של חלק (B.7 §) A. הצד הרחוק עבה יותר, בכ-8–10 ק"מ, משום ששני הצדדים נבנו בדרכים שונות; הצד הקרוב דק ביותר מתחת לימות משום שהם פתחים.

חלק C — החיבור והשחרור. לחץ המקור העמוק אינו לוחץ על הכיפה של הגוף: הוא מושקע בעמוד, ומשקל הגוף עצמו נותן רק כ-3.37 ג'יגה-פסקל במרכזו (C.1§). בקו הקורטציה, ב-22.5° וב-17,287 ק"מ, הדרישה הרדיאלית מן החיבור מתאפסת, אבל נותר עומס צידי של 0.559 מ"ש, 4.06×10^{22} ניוטון — 5.74 ג'יגה-פסקל של גזירה על פני דיסקה ברדיוס 1,500 ק"מ — שצוואר צר וחם אינו יכול לשאת (C.2§). קו הקורטציה הוא המקום שבו המשיכה הרדיאלית מתהפכת: מעבר לו הסיבוב מושך את הגוף כלפי חוץ (C.3§). על פני הטבעת שבין השפה של 6,000 ק"מ לבין הדיסקה של 3,000 ק"מ הגוף מתקלף לאט יחד עם הסיאל שעליו יושב, כמו כדור מתנפח שמתקלף ממשענת מעוגלת; על פני הדיסקה המרכזית החום התיך את הסיאל והחליק את פני השטח (C.4, §C.4a). השכבה החמה שעל הדיסקה מתנגדת להיפרדות, אבל רק מעט: הגוף מתחיל להתקלף כשמרכז המסה שלו מגיע אל קו הקורטציה ומנותק מעט אחריו, כ-210 ק"מ מעבר לקו, נמשך החוצה בכוח ולא משוחרר בעדיניות — המשיכה מלמעלה שמשכה את רכסי השפכטל (C.5§). בסיס האגס עמד בערך על המשווה של אותו זמן; אם המשווה הוא המשווה של היום — זו שאלה של הצירים, עבודה עתידית, וקו הרחוב של השחרור הוא 22.5° של מאמר 4. מצב השחרור שמועבר למאמר 4 הוא קו הקורטציה ב-16,399 ק"מ על המשווה או ב-17,287 ק"מ ב-22.5°, עם שחרור כ-210 ק"מ מעבר לו, ביום של 5.77 שעות (C.6§); שחרור מוקדם יותר ב-20,595 ק"מ עקב אחר האגס המתארך לבדו, ועם הליבה המתמרכזת הקו נמצא בכ-16,400 ק"מ. מרחק השחרור נקבע בחיפוש של C.5a§, שבו שני מבחנים מצומצמים — הנטייה של היום והאקסצנטריות של היום עם ירח צעיר וחם — נפגשים סמוך ל-210 ק"מ מעבר לקו, כשקצת יותר ממחצית הירח כבר חצתה אותו. מתחת למגע נמצאת בליטה אחת שנמשכה לאגס — רחב בבסיס, הולך וצר בקשת אחת, בלי מותניים, עד המגע, וכולו בתוך קו הקורטציה. האגס הוא חלק מכדור הארץ ומוחזק בכבידה של כדור הארץ כמו כל חלק אחר שלו; הוא אינו מזרק החוצה, משום שמהירותו אינה מהירות זריקה והוא לא עבר את קו הקורטציה. בשחרור אורכו כ-8,700 ק"מ ורוחב בסיסו 9,000–11,000 ק"מ; מרוחב הבסיס גוזר המאמר 8.8–12.1 מסות ירח, שהורמו במחיר של 8.1×10^{30} עד 1.05×10^{31} ג'אול, סדר הגודל של האנרגיה שהשתחררה ביצירת הליבה של כדור הארץ (C.7, §C.9§). לאורך הטיפוס הגוף שעל קצהו נפחס ליחס צירים של 1.69 סמוך ל-13,000 ק"מ, ומתעגל פנימה ל-1.20 בשלב המאוחר של החיבור; בשחרור הוא עגול. האגס מרים את הירח רדיאלית, ומשום שהירח

מחובר, הוא נותן לו גם את המהירות הצידיית של מסלול, 4.96 ק"מ/ש' על המשווה; גוף שנזרק מנקודה נמוכה על כדור הארץ, אפילו ב-7 ק"מ/ש', נופל בחזרה, משום שדחיפה מוסיפה גובה אבל לא מהירות צידית (§C.8). האגס מניין את מה שנשא: הסיאל ניקז אל הקצה והפך לקרום, המעטפת של כדור הארץ הפכה למעטפת של הירח, והברזל שקע בחזרה במורד האגס — וזו הסיבה שהליבה של הירח היא אחוז עד שניים ממסתו (§C.10). אחרי השחרור המשיך כדור הארץ להשליך חומר על הירח — כולו חם מאוד: הגושים הגדולים תחילה, וכסערת המאגמה שככה, גושים קטנים, עדיין חמים — ורמות הצד הקרוב, כשכל הימות מוצאים משני הצדדים, נושאות פי 1.19 מכתשים טריים בגודל 1–2 ק"מ לעומת הצד הרחוק: כדור הארץ היה המפזר האחרון של מכתשים קטנים על הירח (§C.11).

חלק D — תחזיות, מבחנים ומסקנות. הדרישות מרוכזות בשלוש-עשרה שורות שכדור ארץ אחד, הזנה אחת וגוף אחד חייבים לעמוד בהן בבת אחת, ואינן נספרות כקולות בלתי תלויים: הזנה בלחץ, קצב בנייה, אנרגיה, גוף מחובר יציב, חוץ שמתקשה מעל בסיס נייד, חיבור שנושא את העומס ואחר כך נכשל, וסדר השלבים; אחר כך כלל החלקים (אזורים בכ-31° ובכ-70°), התייעוד הנישא (המכתשים העתיקים ביותר צפופים ביותר בצד הרחוק, פחות בחגורה, הכי פחות בכיפה, בלי הבדל בקנה המידה), הקרום השכבתי של הצד הרחוק (ברזל שעולה עם העומק, שנבדק בפסגות המרכזיות של המכתשים), השחרור על הקו, הנטייה צפונה של האגס, והיאספות בחזרה בשלמותו אל כדור הארץ, בלי שארית במסלול (§D.1). המאמר מסתיים בתוצאה שלילית אחת — מעבר גלילי חסר מסה, שמעביר לחץ בלבד, אינו יכול לבנות את הירח — ובתוצאה גאומטרית אחת שעונה עליה: החיבור הרחב, החם והמסיבי שהתוצאה השלילית דורשת הוא הקצה הרחב של האגס (§D.3–D.4).

חלק E — מה שהאגס השאיר בכדור הארץ. האגס לא הלך אחרי הירח. השחרור לא הפיל אותו: ההתמיינות, שפעלה על האגס בין שהירח שם ובין שלא, אספה אותו בחזרה אל כדור הארץ במשך עשרות עד מאות מיליוני שנים. החלק הכבד שלו, נושא הברזל, שקע אל בסיס המעטפת מתחת לבסיס האגס, הצד המוביל שלו קופל לתוך הפסים של צפון האוקיינוס השקט, והגב שלו נאסף לתוך הקשתות של מערב האוקיינוס השקט (§E.1–E.2). המודל קורא את שני אזורי המהירות הנמוכה הגדולים (LLVP), אזורים איטיים גדולים במעטפת התחתונה) בבסיס המעטפת כשני דברים שונים: מתחת לאוקיינוס השקט, ברובו האגס שחזר — חלק מן החומר הממוין שחזר אל כדור הארץ — על גבי אונה שנוקזה; מתחת לאפריקה, אונה שמעולם לא הופרעה — במקום שבו הקריאה של מודל ההתנגשות רואה שאריות של הגוף המתנגש ואינה דורשת שום קשר למקור של הירח (§E.3). מבחן המיקום נעשה ועובר: הבסיס סמוך ל-Kiritimati נמצא בתוך האזור של האוקיינוס השקט בכל מודל שנבדק — חמישה מתוך חמישה קולות "איטי", בתוך קו המתאר של 1%– של SMEAN (2.25%–) ושל SMEAN2 (2.36%–) בעומק 2,800 ק"מ, 1,584–1,229 ק"מ מן השפה — כ-1,500 ק"מ צפונית למרכז האזור. ההרכב, הצורה והאיזוטופים הם המבחנים הבאים (§E.4). כל עוד האגס עמד, הכבידה שלו משכה את ליבת כדור הארץ כמה מאות קילומטרים לעברו — 370–270 ק"מ לבסיסים של 9,000–11,000 ק"מ — ואחרי שהאגס נאסף בחזרה הליבה חזרה; האסימטריה מזרח-מערב של הליבה הפנימית היא התייעוד הראשון שיש להשוות אליו (§E.5). העבודה העתידית מונה תשעה חישובים, מן התנועה של הגוף על שכבת המגע ועד הדמיה תלת-ממדית של הגוף המחובר ומשוואת המצב של ההתכה העמוקה.

נספח A — מקורות, הנחות וחידוש. רכיבי המאמר ממוינים לפי מעמדם: פיזיקה סטנדרטית (כבידה, מאזן לחץ ותנע; זרימת Poiseuille במעבר; חוק Stefan להפרדה של שני משטחים המחוברים בשכבה צמיגה), תצפיות קודמות שמשמשות כאילוצים (מים בתכלילי התכה ירחיים, הקרום של GRAIL, הליבה הירחית), חישובים שנעשו כאן (המבחן המשותף של לחץ, זרימה, עומס ומסת המעבר; הגוף על הקצה וכלל החלקים) ורכיבים של המודל המוצעים לבדיקה (ההזנה המחוברת ואונה A). אין טענה לקדימות מעבר למה שסקירה ייעודית תתמוך בו.

נספח B — קבועים וגבולות השחזור. הנספח מציג את הקבועים ואת הקלטים שהם ערכי בדיקה ולא מדידות — צמיגות, צפיפויות המקטעים, רוחב המעבר, משך ההזנה, הקלטים התרמיים של הערכת הקירור. היום של 5.77 שעות ומרחק השחרור נלקחים ממאמר 2; כל מה שהמאמר מחשב מהם אפשר לבדוק מן המשוואות שלו

עצמו. ערך כמו 10.49 ג'יגה-פסקל מודפס בארבע ספרות כדי שהקורא יוכל לחזור על החישוב בדיוק, לא משום שהמרווח ידוע בדיוק כזה.

C.4 מאמר 4 — המסלול (The Orbit)

הטענה

הנטייה של מסלול הירח היא קו הרוחב שממנו יצא: גוף שמשתחרר כשהוא מסתובב מזרחה עם כדור הארץ בקו רוחב λ נכנס למסלול הנטוי בדיוק ב- λ למשווה של כדור הארץ, בלי שום פרמטר לכוונון. כשהוא משתחרר ב- 22.5° , כ-210 ק"מ מעבר לקו הקורטציה המתוקן לקו הרוחב (17,287 ק"מ), ב-17,496 ק"מ, הירח נכנס למסלול כמעט מעגלי ומתרחק מן ההתחלה; חוק הגאות המצומצם מוביל את ה- 22.5° שלו ל- 5.145° במרחק של היום, הערך הנצפה.

חלק פתיחה — הסביבה, הרעיון ומה שהמאמר מציע. המאמר נכנס לתמונה ברגע שבו הירח משוחרר. הסביבה שלו היא זו של מאמרים 2 ו-3: מסות של 5.972×10^{24} ו- 7.35×10^{22} ק"ג אחרי החלוקה, פרמטר כבידתי של הזוג $K = 4.0347667 \times 10^{14} \text{ m}^3 \text{ s}^{-2}$, יום ארצי של 5.77 שעות בשחרור, גוף משוחרר בצפיפות 2,600 ק"ג/מ"ק וברדיוס 1,890 ק"מ, ומגע צמיג רחב בקוטר 3,000 ק"מ. קו הרוחב של השחרור הוא קו הרוחב של מרכז המגע הזה, 22.5° : לגוף יש מהירות אחת, ורוחב הבסיס שלו אינו מפזר את הנטייה שלו. שלושה מקומות מוחזקים בנפרד: בסיס האגס סמוך ל-Kiritimati, הגב שלו ב- 25° צפון, 165° מזרח, וקו הרוחב של השחרור של מרכז הירח. הפתח שממנו עלה הגוף זוהה בין כ- 10° לבין 25° צפון. בסיס האגס עמד בערך על המשווה של אותו זמן; אם המשווה ההוא הוא המשווה של היום — זאת נשאר לצירים, עבודה עתידית. 25° נשמר כמקרה הרגישות התובעני. היעד הוא המסלול של היום: 384,400 ק"מ, אקסצנטריות 0.0549, 5.145° למישור המילקה (האקליפטיקה), התרחקות של כ-3.8 ס"מ לשנה.

חלק A — איזו נטייה מתקבלת ברגע השחרור? הנטייה היא הזווית בין מישור המסלול לבין מישור ייחוס, כאן המשווה של כדור הארץ בזמן השחרור. גוף שנישא סביב על מעגל רוחב נע במקביל למשווה; כשהוא משתחרר, עליו לנוע במישור האחד שמכיל גם את מהירותו וגם את מרכז כדור הארץ, והמישור הזה נטוי בזווית קו הרוחב — כמו אבן שמשוחררת מטבעת מוגבהת של קרוסלה ויוצאת במישור שיורד דרך המרכז. בשלוש שורות, $\mathbf{h} = \mathbf{r} \times \mathbf{v}$ נותן $i_0 = |\lambda|$, $\cos i_0 = \cos \lambda$; המסה, המרחק וקצב הסיבוב מצטמצמים (A.2§). דיסקה ששוקעת מעל המשווה מתחילה כמעט בלי נטייה, ויש להוסיף לה אותה מאוחר יותר; כאן הנטייה נובעת מן המקום על כדור הארץ המסתובב שבו הגוף היה מחובר (A.1§). מהירות רדיאלית משנה את צורת המסלול, אבל לא את הנטייה שלו; רכיב צפוני או דרומי רק היה עושה את המסלול תלול יותר. בשחרור הסיבוב של כדור הארץ מחזיק $2.876 \times 10^{34} \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-1}$ והמסלול של הירח $5.90 \times 10^{33} \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-1}$; ה- 22.5° שביניהם מתחלקים ל- 3.78° בין הציר של כדור הארץ לבין הסך הכולל, ול- 18.72° בין המסלול לבין הסך הכולל. אף אחד מאלה אינו הנטייה למישור המילקה או נטיית הציר של היום, 23.44° ; האופן שבו הצירים של כדור הארץ ושל הירח התפתחו יחד אחרי השחרור הוא עבודה עתידית, שאינה נפתרת בסדרה (A.3§).

חלק B — האם הגוף נכנס למסלול ששורד ומתרחק? גוף בקו רוחב λ מקיף את ציר הסיבוב במרחק $r \cos \lambda$, לא r , ולכן נע לאט יותר מגוף משווני באותו מרחק. על הקו המשווני, 16,399 ק"מ ביום של 5.77 שעות, הוא איטי מדי: האקסצנטריות של מסלולו היא $\sin^2 \lambda = 0.1464$, הוא משתחרר בנקודת הרום (האפוגאום), נקודת השפל (הפריגאום) שלו יורדת ל-12,209 ק"מ, והגאות שהוא מעורר על כדור הארץ מושכת אותו פנימה. כשהוא נישא מעט הלאה, ל- $17287 \text{ km} \cos^{-2/3} \lambda = r_c$ ק"מ ($x = 1.0542$), קו הקורטציה של קו הרוחב שלו, יש לו בדיוק המהירות המעגלית (B.1§). הירח מתחיל להיפרד כשמרכז המסה שלו מגיע לקו הזה, ומשתחרר כ-210 ק"מ מעבר לו, ב-

$r_0 = 17\,496$ ק"מ ($x = 1.0669$). שם הוא נע מעט מהר יותר ממה שמעגל דורש: נקודת השחרור היא הפריגיאומו של מסלול כמעט מעגלי ($e_0 \approx 0.037$, אפוגיאומו ב- $18\,830$ ק"מ), והגאות דוחפת כלפי חוץ מן הרגע הראשון וממשיכה לדחוף בזמן שהירח מתרחק (B.2§). הגוף נמצא כ- $7\,200$ ק"מ מחוץ לגבול רוח הקשיח, $10\,314$ ק"מ; הגבול הקשיח הוא שחל, משום שהירח בשחרור עגול, הקליפה החיצונית שלו קשיחה, ויחס הצירים שלו 1.04 לכל היותר (מאמר 2, B.7§). המסלול ההתחלתי הוא אפוא $a_0 \approx 18\,163$ ק"מ, $e_0 \approx 0.037$ והפריגיאומו בנקודת השחרור, $i_0 = 22.5^\circ$ למשווה של אותו זמן (B.3§). גרסה מוקדמת יותר מיקמה את השחרור רחוק יותר, ב- $20\,595$ ק"מ; עם הליבה שמתמרכזת בזמן ההעברה היום בשחרור הוא 5.77 שעות, והשחרור מעט מעבר לקו המתוקן לקו הרחוב מחליף אותה.

חלק C — כיצד משתנה מישור המסלול בדרך החוצה? ה- 22.5° נמדדות מן המשווה של כדור הארץ; ה- 5.145° של היום — ממישור המילקה, המישור של מסלול כדור הארץ סביב השמש. קרוב לכדור הארץ הבליטה המשוונית גורמת למסלול לנקוף (לבצע פרצסיה) סביב המשווה; רחוק בחוץ, השמש גורמת לו לנקוף סביב מישור המילקה; משטח Laplace מתכופף מן האחד אל השני (C.1§). קנה מידה בסדר גודל למעבר, כשהבליטה מותאמת ליום של 5.77 שעות, הוא כ- 17.07 רדיוסי כדור הארץ; השחרור נמצא בכ- 16.1% ממנו, עמוק בתוך האזור שבו המשווה שולט במישור. אם המסלול עוקב בצורה חלקה אחר המישור המסתובב תלוי בנטיית הציר של כדור הארץ, בקו הצמתיים, באקסצנטריות ובקצב ההתרחקות, והדבר דורש אינטגרציה של מערכת הצירים (C.2§). הצורה המאובנת של הירח ומצב Cassini שלו הם אילוצים נוספים, לא שלבים שקו הרחוב של השחרור קובע; מודל תרמי-מסלולי שפורסם מוצא שהצורה קפאה לפני כ- 16 רדיוסי כדור הארץ (C.3§).

חלק D — כמה מן הנטייה שורד, ובאיזה זמן? החוק הפשוט ביותר של דעיכה גאותית, $di/da = -\frac{1+\epsilon}{2a} \sin i \cos i$, ניתן לאינטגרציה מדויקת ל- $\tan i \propto a^{-(1+\epsilon)/2}$: חוק ב- $\tan i$, לא ב- $\sin i$, וזה משנה בזווית התחלתית של 22.5° . מ- $a_0 \approx 18\,163$ ק"מ ל- $384\,400$ ק"מ המרחק גדל בערך פי 21 , $\tan i$ קטן בערך פי 4.6 : 22.5° הופכות ל- 5.145° , הערך של היום, כך שקו הרחוב שמחזיר את הזווית הנצפית הוא 22.5° עצמו; שחרור 8% מעבר לקו נותן 5.282° , והתחלה ב- 25° נותנת 5.788° . הזווית הסופית נקבעת בידי קו הרחוב של השחרור, לא בידי המרחק ההתחלתי (D.1§). משום שאותו קצב מכפיל גם את ההתרחקות וגם את הדעיכה, מקדם האיכות הגאותי של כדור הארץ, Q , מצטמצם מן החוק הזה — אבל לא מן ההיסטוריה התרמית, שקובעת עד כמה הירח עצמו מפזר אנרגיה בכל מרחק (D.2§). מבחן השעון מספק את הזמן: עם $Q = 12$ קבוע, קצב ההתרחקות של היום יוצא כ- 3.70 ס"מ לשנה, אבל המרחק של היום מושג בתוך כ- 1.60 מיליארד שנה; Q של 33.8 ממלא 4.5 מיליארד שנה, אבל נותן קצב של היום קטן בערך פי שלושה. הזמן הזמין אחרי השחרור לפני 3.873 מיליארד שנה הוא כ- 3.9 מיליארד שנה, לא 4.5 ; מול 3.87 מיליארד שנה השעון מתאים ב- $29 \approx Q$, שבו הקצב של היום יורד לכ- 1.5 ס"מ לשנה, והמסקנה זהה. שום Q קבוע אינו מתאים לשניהם; הפיזור של כדור הארץ חייב היה להשתנות עם הזמן, כפי שמודלים של תהודה באוקיינוס מוצאים (D.3§).

חלק E — מה הוכח ומה ייבדק? שבע טענות מוצגות לפי מעמדן, ממה שקבוע ועד מה שעוד צריך לחשב: מקור הנטייה, זהות גאומטרית שמתקיימת בשחרור בלי מהירות צפון-דרום ובלי מומנט כוח בזמן הניתוק; האליפסה ההתחלתית, מכניקה של שני גופים; ההתרחקות ההתחלתית והשרידות, מחושבות, ובדיקת העיוות פתוחה; והנטייה של היום, המרחק עם השעון שלו, והקשר הגאוגרפי של קו הרחוב של השחרור למקום על כדור הארץ, שכל אחד מהם דורש אינטגרציה או שחזור עצמאי. הזהות $i_0 = |\lambda|$ עומדת בלי תלות בקשר הגאוגרפי, שנוגע רק לאתר המקור. התרומה מנוסחת: הזהות היא מכניקה סטנדרטית; מה שהמודל מוסיף הוא שהמסלול ההתחלתי נקבע בידי הבנייה של מאמרים 2 ו-3, ולא נבחר כדי להתאים. העבודה העתידית מתחילה באינטגרציה תרמית-מסלולית מצומדת ממצב השחרור, דרך המעבר של מישור Laplace ומצב Cassini, עם פיזור תלוי זמן, וממשיכה בהיסטוריית הפיזור של כדור הארץ מן היום של 5.77 שעות, בערוץ נטיית הציר שנפתח בהטיה של 3.8° בשחרור, בהתמצקות של אוקיינוס מאגמה מתחת למכסה חד-צדדי, ובצורה המאובנת.

נספח A — נוסחאות לשחזור המבחן הגאותי. במסגרת של פיגור זמן קבוע, הגאות שמתעוררת על כדור הארץ דוחפת את הירח כלפי חוץ כאשר $\omega \cos i/n$ עולה על גורם שתלוי רק באקסצנטריות ושווה ל-1 במעגל: כדור הארץ חייב להסתובב, במישור המסלול, מהר יותר משהירח מקיף אותו. המבחן נותן $0.7526 < 1.1962$ על הקו המשווני (התכווצות), שוויון על קו הקורוצציה, $1.013 > 1.077$ בשחרור המאומץ כ-210 ק"מ מעבר לו (התרחבות), ו- $1.0532 > 1.1660$ ב- $x = 1.08$ (התרחבות); הסימן נבדק גם באינטגרציה של הכוחות הגאותיים לאורך מסלול אחד. קוד קצר משחזר את האליפסות, את הסימן הגאותי ואת הזוויות 5.145° ו- 5.282° .

נספח B — היקף האימות וזמינות. הנספח מציין מה נבדק ומה לא. אינטגרציה ניוטונית עצמאית של מסלול הייחוס חזרה לנקודת ההתחלה שלה בתוך כ- 1.6×10^{-10} מן המרחק שלה, ובכך אישרה את החשבון המסלולי של קירוב המונופול; היא אינה בודקת את החיבור או את הראולוגיה. האינטגרציה התרמית-מסלולית המצומדת המלאה אינה כלולה, ואינה מדווחת כאילו בוצעה.

c.5 מאמר 5 — הימות (The Maria)

הטענה

ים הוא פתח בקליפה של הירח מעל *כיפת הזנה*: גוף שנדחף למעלה ממוקד שמתחת לפני השטח, ודרכו עלה החומר, הושלך החוצה, וחזר כחומר החוזר שיצר את המכתשים. מישור הבזלת הכהה הוא רק השכבה האחרונה שקפאה בפתח. כשסופרים כך, הימות אינם נמצאים במקום שבו נמצאת הבזלת: 33 מתוך 34 הימות יושבים על כיפה בשדה הכבידה, ו-44 מתוך 73 הכיפות שבשדה הזה שוכנות מתחת לרמה בהירה, 36 מהן בצד הרחוק.

מאמר 5 שואל מהו ים, אם אינו אגן שנחפר בידי גוף שבא מבחוץ והוצף בלבה זמן רב אחר כך. הוא עונה בהגדרה, ואחר כך בודק את ההגדרה בחמישה תיעודים בלתי תלויים: הכבידה של הכיפות, הגובה של הרצפות, המכתשים על הרצפות ומסביבן, הברזל והטיטניום של הקרקע, והתוריום. למאמר חמישה-עשר חלקים ונספח אחד.

חלק A — מונחים והגדרות. הספרות משתמשת במילה אחת, ים, למשטח כהה, לבור שמתחתיו ולסיפור של האופן שבו הבור התמלא. חלק A נותן לכל אחד מהם שם משלו. *כיפת ההזנה* היא הגוף הצפוף שמתחת; היא אינה חדירה שהגיעה למנוחה, אלא הצורה שהזרם בנה בזמן שעבר כלפי מעלה, כמו מעיין חזק שמרים תל מעל מוצאו כל עוד הוא זורם. *הפתח* הוא המקום שבו ההזנה הגיעה אל פני השטח; הוא אינו צינור בעל דפנות, אלא אזור של התכה נזילה בתוך חומר קשיח יותר, שדרכו עובר הלחץ. *יציאה* השליכה חומר החוצה; *פי פתח* העביר חומר בעודו מכוסה, ונחשף מאוחר יותר, כך שמבנה אחד יכול להתחיל כפי פתח ולהסתיים כיציאה. *הים* הוא הפתח יחד עם פני השטח האחרונים שלו, והאגן הוא השוליים שהפתח בנה מן החומר החוזר שלו עצמו. כלל שני מפריד בין המקום שממנו בא החומר של מכתש לבין המקום שבו הוא נחת: המכתשים שרואים על פני שטח הם הרקע, ועוד אלה שיצר פתח סמוך, פחות אלה שהפתח התיך או כיסה בזמן שהיה פעיל. ספירת מכתשים היא אפוא סכום של שלושה תהליכים, ולא שעון פשוט.

חלק B — מה שהסדרה כבר קבעה. שני קלטים נלקחים כמות שהם ואינם נגזרים מחדש. ממאמר 3 בא הגוף שעל קצה האגס: הקצה ברוחב 6,000 ק"מ כשההתעגלות החלה, וברוחב 3,000 ק"מ בשחרור; *הגבעה*, האזור ברוחב 6,000 ק"מ שנח על הקצה, שמרכזו היום ב- 16.6° צפון 13.1° מזרח ושמכיל 99% משטח הבזלת הכהה של הצד הקרוב; *המגע*, 3,000 הק"מ האחרונים שעוד נגעו בכדור הארץ בשחרור, שמרכזו ב- 24.1° צפון 335.2° מזרח ושמכיל 66% ממנו, ו-Imbrium בתוכו (14.8° ממרכזו); אזורי החשיפה, כיפה כדורית (cap) של 31° וחגורה עד 70° , שהועברו אל הירח של היום לפי כלל החלק היחסי; והגוף הקל, המוקצף, בצפיפות 1,300 ק"ג/מ"ק.

ממאמר 6 בא המקור של המכתשים: כ-99% מהם עשויים מחומר ארצי חוזר. הצד הקרוב דק-קרום משום שהפתחים שלו והחום שמתחתם סילקו את השכבה העליונה והקלה שלו, ולא להפך.

חלק C — מהו ים, כמה ימות יש, והים כמקור. הספרות סופרת בזלת כהה: 646 יחידות ממופות תחת 97 שמות, 189 מהן בשטח של 1,000 קמ"ר ומעלה, ו-20 אגנים בקוטר של 500 ק"מ ומעלה. המודל סופר פתחים מעל כיפות הזנה. המחבר זיהה 34 ימות על השיפועים של שדה הכבידה של GRAIL (14 בצד הקרוב, 20 בצד הרחוק); בנפרד, חיפוש אוטומטי לקח כל רמה עגולה בקוטר 100 ק"מ ומעלה, שעומדת 50 מיליגל ומעלה מעל הטבעת שסביבה, ככיפת הזנה, ומצא 73. שני הקטלוגים נבנו באופן בלתי תלוי, ו-33 מתוך 34 הימות יושבים על כיפה (מחקר 1). ב-20,000 קבוצות אקראיות של 34 נקודות אף אחת לא הגיעה ל-33; במקרה, נקודות נופלות על כיפה בערך 8 פעמים מתוך 34. היוצא מן הכלל היחיד, Ingenii, שוכן מעל South Pole–Aitken, שהחום שלו "בישל" את הכיפה שלו עד שנעלמה. המישורים הכהים שאין כיפה מתחתם — Procellarum, Tranquillitatis, Frigoris, Nubium ואחרים — אינם ימות אלא מישורים: קרום שנמס במקומו בחום של כדור הארץ, בלי תעלה אל העומק. המחצית השנייה של החלק קוראת את הקרקע. מסביב לשישה ימות ולשלושה מישורים נבחרו 11,574 מכתשים בקוטר 5–60 ק"מ, והבחירה הוקפאה לפני שנקרא נתון כימי כלשהו, יחד עם 5,922 מכתשי ביקורת במרחק של יותר מ-600 ק"מ מכל בזלת (מחקר 2). מסביב לימות הקרקע נושאת 5.96% FeO במשקל בטווח של 50 ק"מ, ועדיין 3.40% במרחק 300–600 ק"מ, לעומת 2.30% בביקורת; מסביב למישורים הערך יורד ל-2.60%, קרוב לביקורת. ים השליך את החומר שלו רחוק; מישור רק גלש מעבר לשפתו. כל מכתש עני מעט יותר מן הקרקע שלו (0.26%– במשקל בטווח של 50 ק"מ, 0.01%– בביקורת): הוא השליך הצידה את הציפוי הדק, העשיר בברזל, שהים הניח, ופתח את התשתית העניה יותר שמתחתיו, כפי שמראה Dionysius שליד Tranquillitatis.

חלק D — הפתחים, הנראים והקבורים. אם הים הוא הפתח ולא הבזלת, חייבים להיות פתחים גם במקומות שבהם לא רואים בזלת. הכבידה רואה אותם מבעד לכיסוי שלהם. פתח מובחן ממכתש לפי הקרום שמתחתיו: כיפה שנדחפה מלמטה מדללת את הקרום מעל מרכזה, ומכתש שנוצר מלמעלה אינו עושה זאת. מתוך 36 הפתחים שסומנו, 26 מראים את קפיצת הקרום הזאת, בשיעור של 8 ק"מ ומעלה (Moscoviense +29 ק"מ, +28 Orientale), לעומת 4 מתוך 169 מכתשים רגילים (מחקר 3); השישה שאינם מראים אותה, וביניהם Tsiolkovskiy, הם מכתשים שנחתו על אזור לבה. במיון לפי כיסוי, 36 מתוך 40 הכיפות של הצד הרחוק קבורות, ו-22 מתוך 33 הכיפות של הצד הקרוב שוכנות מתחת לים; בספירה לפי כיפות, בצד הרחוק יש יותר פתחים מאשר בצד הקרוב, 40 לעומת 33. מעל כיפה קבורה הברזל והתוריום שווים לאלה של היבשה שמסביב (0.19– % FeO במשקל, +0.05 ppm), הקרום עבה יותר ב-8–13 ק"מ, ואין עליה התקבצות של מכתשים (מחקר 4): זהו פתח שמונחת עליו שמיכה, שנקבר יחד עם המכתשים של זמנו. שתיים מן הכיפות הקבורות של הצד הקרוב, Balmer–Kapteyn ו-Schiller–Schickard, חופפות ימות נסתרים (cryptomaria) שכבר היו ידועים. Procellarum הוא דיסקת המגע עצמה, ומכיל כמה כיפות. הדורות של הפתחים, וקריאת כל אחד מהם כיצאה או כפי פתח, נרשמים פעמיים, לפי המראה ולפי המיקום, ושתי הקריאות נשמרות.

חלק E — כיפת ההזנה. כשההזנה פסקה, החומר שנשאר בכיפה קפא לגוף עשיר יותר בברזל ובטיטניום, וצפוף יותר, מן הקרום שמסביבו; העוצמה שלו היא עודף הכבידה במרכזו ביחס לטבעת שסביבו. בין הימות הפתוחים, Orientale מגיע ל-740 מיליגל, Moscoviense ל-689 ו-Nectaris ל-538; הכיפות הקבורות של הצד הרחוק חזקות באותה מידה (Freundlich–Sharonov 519), ולכן ים קבור אינו פתח שנכשל. הרצפה שמעל כיפה צריכה להיות הנמוכה ביותר מעל מרכזה, ויותר ככל שהכיפה חזקה יותר. הסיבות האפשריות הן משקל הכיפה, שאיבה מלמטה, והתפשטות והתכווצות תרמית עם חום וקור — המשמעותית ביותר במודל — שפועלת בעוצמה רבה יותר ככל שהמסה גדולה יותר בקוטר ובעומק; איזו מהן פועלת — מבחן שעוד ייעשה. בימות הפתוחים המרכזי נמוך מן השוליים ב-10 מתוך 12 (חציון 267– מ'), ומקדם המתאם הדרגתי בין עוצמת הכיפה לגובה המרכז הוא $\rho = -0.59$ (מחקר 5). שני היוצאים מן הכלל הם Imbrium ו-Serenitatis, הימות הגדולים של המגע, שמרכזיהם

עומדים מעט מעל שוליהם (+60 ו-43 מ'). בזמן החיבור הם היו חמים והעבירו מאגמה מן האגס אל הירח. Serenitatis קפא ראשון, קרוב מאוד לכדור הארץ, והכבידה של כדור הארץ משכה אותו החוצה יותר; Imbrium קפא מאוחר יותר, אחרי הניתוק, כשהירח התרחק, והמשיכה השפיעה עליו פחות — ומכאן +60 מול +43 מ', ו-Imbrium הנמוך מבין השניים. הספרות צופה שקיעה דומה מן העומס של מסקון (mascon, ריכוז מסה תת-קרקעי); המודל מסכים על הצורה ונותן לגוף הצפוף שם אחר — כיפת ההזנה הקפואה, שנמצאת גם מתחת ל-44 הפתחים שאין בהם בזלת.

חלק F — הרצפה, הרצפות והמפזר האחרון. נוזל במנוחה אינו יכול להחזיק שיפוע, ולכן רצפה שקפאה כגוף אחד של התכה מראה מפלס אחד. כל 16 הרצפות הגדולות מראות מפלס אחד, וכך גם 188 מתוך 189 יחידות קטנות יותר; כל 16 נמצאות מתחת לשפה שלהן, בכ-3 ק"מ (חציון 3.4 ק"מ), ומתחת ליבשה שלהן (חציון 1.6 ק"מ), מה שבמקרה היה קורה פעם אחת ב-65,000 (מחקר 6). רכסי הקמטים שוכנים ב-0.71–0.77 מן הרדיוס, והגרביים (שקעים טקטוניים מוארכים) ב-0.76–1.22: השוליים נמתחו והפנים נדחס כשהמרכז שקע. במגע, Imbrium, Copernicus H, Sinus Aestuum ו-Imbrium עומדים בגובה המישורים שלצדם (0.25–, 0.13 ו-0.03 ק"מ), בלי מדרגה בשפה; Serenitatis נמוך מהם ב-0.84 ק"מ, משום שהשוליים שלו הם שכבות המכתשים שיצאו ממנו. מעבר למגע, 9 מתוך 13 הרצפות שיש להן מישור מדיד שוכנות מתחתיו (חציון -0.52 ק"מ): ששת האגנים הגדולים — Nectaris, Crisium, Humboldtianum, Smythii, Orientale ו-Moscoviense, האחרון מ-21 פיקסלים בלבד של מישור — שוכנים קילומטר עד שניים מתחתיו (1.0–2.2 ק"מ), Humorum ו-Apollo כחצי קילומטר, Grimaldi (-0.13 ק"מ), Poincaré, Crüger-Sirsalis ו-Schiller-Zucchiuss בטווח של 0.2 ק"מ, Ingenii ו-South Pole-Aitken, עומד 2.1 ק"מ מעליו; העומק מתחת למישור שייך לאגנים הגדולים ולא לימות הקטנים (גרסה מוקדמת אמרה שכל ים שמעבר למגע שוכן קילומטר עד שניים מתחת למישור שלו). מסביב לימות הרחוקים הקרקע מתרוממת לצווארון שנבנה מן החומר החוזר שלהם עצמם: +742 מ' מסביב לימות הקבורים לעומת +122 מ' בביקורת (מחקר 16). כל רצפה נקייה בהרבה מן היבשה שלה: ממכתשים בקוטר 2–5 ק"מ רצפה נושאת שנים-עשר מן הצפיפות של היבשה שלה (מחקר 7). המכתשים המעטים שהרצפות נושאות מסדרים אותן לפי זמן הקפיאה, והמגע אחרון: מעבר למגע הרצפות נושאות פי 83 מצפיפות המכתשים בקוטר 10 ק"מ ומעלה שרצפות המגע נושאות, ורצפות הגבעה פי 33, כשהרשויות של האגנים עצמם בקטלוג מוצאות (מחקר 12; גרסה מוקדמת, שספרה אותן, נתנה 58 ו-24). המקור של המכתשים האחרונים האלה הוא המפזר האחרון, כדור הארץ, שאחרי השחרור המשיך להשליך חומר מכל הצדדים.

חלק G — גודל ומצב: הימות והמכתשים בזמן. חלק זה משותף למאמר 6 (שם הוא חלק E), והמחקר העיקרי שלו ממוספר במשותף: מחקר 8 כאן, מחקר 5 שם. בתוך Imbrium שלושה מכתשים מראים שלושה מצבים — Sinus Iridum מומס עד מחציתו, Plato מרוח, Kirch חד. כל מכתש בקוטר 3 ק"מ ומעלה על הבזלת של הצד הקרוב (3,478 בסך הכול) נמדד מול מכתשי רמה באותו גודל. בתוך המגע הרצפות נושאות שליש מן המכתשים הקטנים של המישורים שלצדן (263 לעומת 836 למיליון קמ"ר בקוטר 2–5 ק"מ): השאר נעלמו בתוך הימות הפעילים. על הרצפות החלק של המכתשים החדים יורד מ-71% בקוטר 3–5 ק"מ לאפס בקוטר 20–40 ק"מ, והחלק של המכתשים המומסים עולה מ-17% ל-85%. שני שעונים רצים יחד: הימות התקררו (מכסה קפוא מתעבה כשורש הזמן, ולכן ים עמוק פי עשרה נשאר נוזלי פי מאה זמן), והחומר שהגיע מכדור הארץ נעשה קטן יותר, אם כי עדיין חם, שכן ההגעה אל הירח דרשה 8.8 ק"מ/ש' במרחק 17,000 ק"מ ו-10.6 ק"מ/ש' במרחק 60,000 ק"מ. מכתש גדול הוא אפוא מכתש מוקדם על רצפה רכה. במישורי המגע, שחוממו מכדור הארץ שמתחתם, השפות של המכתשים הגדולים אבדו בצד הפונה אל המישור (+24% מן הכיוונים) והפסגות ששרדו שלהן התקוהו, ואילו במישורים שמעבר למגע הן רק הוצפו (מחקר 15).

חלק H — המנוע. פתח חי כל עוד ההתכה שלו מוזנת ויכולה לזרום. הכוח מועבר בנוזל: גוף מוצק היה צריך לשאת 13–16 ג'יגה-פסקל מול חוזק של כ-0.2 ג'יגה-פסקל, כמו שהנוזל בצנרת הבלמים מעביר את הלחיצה על הדוושה בלי להתנגד לה. באותו זמן היו בתוך החומר ומסביבו כמויות עצומות של חומרים נדיפים: הם הקלו את

ההתכה והרחיבו אותה, ודחפו החוצה את החומר שבנה את השוליים. מאז הם התאדו לחלל, והפנים היבש שנמדד היום הוא הירח אחרי שהם עזבו. השטף דרך פתח מתחלק למה שנשאר בגוף ולמה שהושלך, ורק החלק שהושלך יצר מכתשים. פתח נאטם כשהשטף שלו יורד מתחת לשטף הקריטי, שבו החום שהוא מביא כבר אינו מאזן את ההתקררות שלו, כמו ברז שמשאירים פתוח כדי שהצינור לא יקפא; חישוב השטף הזה הוא דרישה מוצהרת. בזמן החיבור, הצד הקרוב פנה אל כדור ארץ בטמפרטורה של כ-2,000 K שמילא חמישית מן השמים שלו (מקדם צפייה 0.205), וזה החזיק את פני השטח שלו קרוב ל-1,345 K, מעל הסולידוס (הטמפרטורה שבה מתחילה ההתכה): לאורך כל תקופת החיבור הפתחים של הצד הקרוב נשארו חמים ופתוחים והעבירו מאגמה מן האגס אל הירח, ואילו הצד הרחוק, שפנה אל החלל, קפא. בשחרור ימות הצד הקרוב היו עדיין חמים ובעלי צמיגות נמוכה, ולכן הרצפות שלהם חלקות כמו אגם שקפא; הם קפאו רק אחר כך, לאט ומבחוץ פנימה, במשך מאות מיליוני שנים ועד מיליארד או שניים.

חלק I — הגאומטריה של החשיפה, והדורות. כשהקצה הצטמצם מ-6,000 ל-3,000 ק"מ, השפה של המגע נעה פנימה על פני הקליפה כמו חזית, והמרחק של פתח ממרכז המגע מראה מתי הוא נחשף — כמו כדור מרוקן שמנפחים על הרצפה, שמרים את פאותיו מן הרצפה אחת אחת, והמרכז אחרון. פתח מכוסה היה פי פתח, ונעשה יציאה כשהחזית עברה, בתנאי שעוד היה פעיל; התנאי מוצג במאמר בתיבה כ- $t_{\text{shutdown}} \geq t_{\text{exp}}$ (זמן הכיבוי אינו מוקדם מזמן החשיפה). מכאן שלושה דורות: דור I בצד הרחוק, פתוח מן ההתחלה; דור II בחגורה, תחילה פי פתח ואחר כך יציאות; דור III במגע, פי הפתח האחרונים, שנחשפו לקראת השחרור. הימות השליכו הכי הרבה בשלב הפחיסות; הצד הרחוק נאטם בהתעגלות פנימה; הצד הקרוב היה עדיין חם בשחרור וקפא רק אחריו, ולכן Imbrium נושא 11 מכתשים בקוטר 20 ק"מ ומעלה למיליון קמ"ר, לעומת 205 ברמות. כמה פתחים בקצה הדיסקה ובצד הרחוק נשארו פעילים מעט יותר. הגודל של פתח הוא זיכרון של ההזנה שלו: שש כיפות ההזנה הגדולות ביותר, בקוטר 450–909 ק"מ, שוכנות כולן בצד הקרוב, והקוטר החציוני הוא 375 ק"מ שם לעומת 227 ק"מ בצד הרחוק, שבו הגדולה ביותר היא Orientale, 435 ק"מ (גרסה מוקדמת אמרה שפתחים בקוטר 200–1,200 ק"מ שוכנים כמעט כולם בצד הקרוב).

חלק J — כימיה. הברזל והטיטניום יורדים בטבעות מסביב לכל ים: באיחוד של שישה ימות, מ-6.9% FeO במשקל ב-0–25 ק"מ ל-3.1% ב-100–150 ק"מ, ונשארים ב-3.3–3.4% עד 600 ק"מ, לעומת 2.3% בביקורת; מסביב ל-Procellarum הם יורדים לרמת הביקורת (מחקר 9). הירידה מתעדת גם את האטימה: חומר קל, עשיר בחומרים נדיפים, עף רחוק מוקדם, וחומר כבד, עשיר בברזל, נחת קרוב מאוחר. התוריום, שנשאר בנוזל האחרון של התכה מתקררת, מוחזק בידי המגע: דיסקת המגע, 17.5% מפני השטח, מכילה 95% מן התוריום שמעל 3 ppm. כיפה קוטבית באותו גודל שהוזז על פני 16,200 מרכזים מציב את מרכז המגע, שנקבע לפני שהתוריום נקרא, במקום השלישי, 47 ק"מ מן המרכז הטוב ביותר (מחקר 10). בתוך המגע המישורים והרמה נושאים כמעט אותו תוריום (5.62 ו-5.48 ppm), והימות הכי מעט (3.99): הנוזל האחרון נושא התוריום שקע בחזרה בתעלות שלהם. כל ים של המגע עני יותר מן הטבעת שלו (מחקר 13). אם קוראים את הימות כאגנים של גופים פוגעים חיצוניים, הם דורשים כ- 1×10^{19} ק"ג של מסה זרה, אבל ההתכות של Imbrium אינן מתאימות לשום קבוצה של כונדריטים, והאגנים המאוחרים הוסיפו מעט (מחקר 11).

חלק K — תיארוך. פתח נושא חמישה שעונים: מתי נוצר, מתי נחשף, מתי התחיל להשליך, מתי נאטם, וגיל פני השטח שלו היום — כמו באר שנחפרת, נחשפת, נובעת, נסתמת ומשאירה שלולית אחרונה בפיה. הגילים הרדיומטריים (Apollo 3.1–3.9 מיליארד שנה, Chang'e-5 כ-2.0 מיליארד שנה, Chang'e-6 כ-2.8 מיליארד שנה) מתארכים את הרגע שבו הדגימה התקררה מספיק כדי להחזיק את אטומי הבת שלה, ולא את הרגע שבו הפתח נוצר. ספירות מכתשים משמשות רק לסידור פני שטח, ולעולם אינן מומרות לשנים, משום שקצב ההגעה הקבוע שההמרה מניחה הוא בדיוק מה שמאמר 6 מחליף. סדר האטימה שנקרא מן הרצפות הוא: הפתחים הקבורים של הצד הרחוק ראשונים, הימות הפתוחים של החגורה אחרים, והימות של המגע אחרונים.

חלק L — סטטיסטיקה. כל השוואה של הקרקע היא השוואה של דומה לדומה: הימות מוצאים משני הצדדים, וההשוואה אומרת זאת במפורש. השטחים מחושבים על הכדור, מכתשים משויכים לפי מרכזיהם, וכל כיפה נבדקת בשני סינונים של שדה הכבידה. טבלה אחת מרכזת כל תוצאה שנמדדה עם המדגם ואי-הוודאות שלה, וביניהן מבחן הסימן של 16 מתוך 16 ($p = 1.5 \times 10^{-5}$), הצווארון של +471 מ' לעומת +122 מ' (Mann–Whitney, $p = 0.009$), והמכתשים החדים של רצפות המגע, 82% לעומת 56% (Fisher, $p \approx 5 \times 10^{-6}$).

חלק M — חיזויים ומבחנים. ארבעה רעיונות שהוחזקו במהלך העבודה שונו בעקבות המדידה: שיא של מכתשים על כל שפה (נמצא רק כתכונה של הימות העשירים בחומרים נדיפים), תעלה לאורך הדפנות (הנקודה הנמוכה ביותר שוכנת ב-0.57 מן הרדיוס), זרם לבה שבונה את השוליים הרחוקים (הבזלת מכסה 0–7% מן הטבעת), ושטח הים כמדד להשלכה. מתוך חמישה-עשר המחקרים, שלושה-עשר ירוקים ושניים כתומים: במחקר 13 חלק התוריום עמד, וחלק הטיטניום לא הפריד בין האזורים; במחקר 16 הצווארון אינו נפרד מן הביקורת כשבדקים את הימות הרחוקים הפתוחים לבדם. המחקרים ממוספרים 1 עד 16; מחקר 14 בוטל, ושאר המספרים נשמרו. אחריהם באים שנים-עשר חיזויים, כל אחד עם המבחן שלו — וביניהם פתח מעל כל כיפת הזנה בשלב כלשהו, גוף צפוף מתחת לכל רצפה ששקעה, קרקע ליד ים עשירה בחתימה שלו יותר מקרקע רחוקה, והתכות אגנים שאינן נושאות באיזוטופים שלהן את המסה המטאוריטית של גוף בגודל שהספרות מניחה.

חלק N — דיון. חמשת התיעודים מספרים רצף אחד. הפתחים נחשפו בסדר שקבע המגע המצטמצם; כל אחד מהם השליך חומר על היבשה שמסביבו כל עוד היה פתוח; כשההזנה שלו פסקה, הרצפה שלו קפאה במפלס אחד ושקעה מעל הכיפה שלו; הפתחים הרחוקים נקברו בשכבות שהם עצמם בנו, והקרובים נשאר חמים ופתוחים כל עוד הגוף היה מחובר, וקפאו לאט אחרי השחרור; והמגע מחזיק את התוריום. הקריאות של הספרות מסבירות חלקים מזה — האגנים העגולים, התוריום של Procellarum, הבזלת במקומות נמוכים — אבל לא את 44 הכיפות שאין עליהן אגנים, לא את התוריום המשותף לבזלת ולרמה בתוך המגע, ולא את הרצפות ששקעו רק מעל כיפות חזקות. המבחנים המכריעים הם הכיפות הקבורות, הרצפות שמעליהן, טבעות הברזל והמסה הזרה.

חלק O — מסקנות. שמונה מסקנות, לפי הסדר: ים הוא פתח מעל כיפת הזנה; כשסופרים כך, יש 73 כיפות, 44 מהן קבורות, ו-33 מתוך 34 ימות יושבים על כיפה; הכיפות הקבורות נושאות את הכיסוי של היבשה ו-8–13 ק"מ של קרום עודף; כל רצפה היא מפלס אחד מתחת לשפה שלה ושקעה מעל הכיפה שלה; הימות הם המקור של הברזל שמסביבם; הרצפות נקיות, והמגע הנקי ביותר; המגע מחזיק את התוריום; והאגנים, אם קוראים אותם כגופים חיצוניים, דורשים מסה זרה שההתכות שלהם אינן נושאות. העבודה העתידית מונה את השטף הקריטי, את טבעת השפה מול החומרים הנדיפים שנמדדו, את המפזר האחרון לפי מרחק, את איזוטופי הרתניום והאוסמיום של כל אגן, את התוריום בעומק 26 ק"מ, ואת הבזלת הצעירה ביותר מול מרכז שנקבע מראש.

נספח A — קטלוג הפתחים. הנספח מונה את 34 הימות עם המיקום, המרחק מן הנקודה שמתחת לכדור הארץ, האזור והדור, את כיפת ההזנה שמתחת לכל אחד, ואת הכיסוי שלה: 4 במגע (דור III), 11 בגבעה (דור II) ו-19 מעבר לה (דור I); שלושה מהם — Ingenii, Apollo ו-Bailly — מעל South Pole–Aitken. המחבר סימן תחילה 36 פתחים בעין, ממוספרים 1 עד 36, כשנקודה 35 היא Copernicus H ונקודה 36 היא Sinus Aestuum; 36 הסימונים האלה הם המדגם של מבחן הקרום. שישה סימונים לא עמדו כימות, וארבעה נוספו מאוחר יותר (37–40), כך שהקטלוג מכיל 34 ושומר על המספרים המקוריים. במקום שבו מאמר 1 מדבר על 34 הימות, הכוונה לקטלוג הזה; במקום שבו הוא מדבר על מבחן הקרום, הכוונה ל-36 הסימונים.

המכתשים העתיקים ביותר של הירח נוצרו עליו בזמן שעוד היה על כדור הארץ: חומר שהושלך מן הפתחים חזר אל הקליפה במהירות שבה עזב — 5 ק"מ/ש' בדרך החוצה, 5 ק"מ/ש' בחזרה, 46 ג'יגה-פסקל על בזלת — והמכתשים עלו יחד עם הקליפה. כ-99% מן המכתשים של הירח עשויים מחומר ארצי חוזר, שהושלך בידי הימות. הסיבוב של הגוף המחובר מיין את הנחיתות: החצי הנגרר אסף הכי הרבה מכתשים, והחצי המוביל את הקשים ביותר.

מאמר 6 שואל שתי שאלות: האם חומר חוזר יכול לנחות מהר מספיק כדי ליצור מכתש ולהשאיר את סימני ההלם, והאם המכתשים של הירח של היום נקראים כמו התייעוד שנחיתות כאלה היו משאירות? על הראשונה הוא עונה בפיזיקה של המעוף, ועל השנייה במדידות על הירח כולו. למאמר שבעה-עשר חלקים ונספח; המחקרים שלו ממספרים במשותף עם מאמר 5.

חלק A — מונחים והגדרות. המילים *מכתש*, *פגיעה* ו*עומק* נושאות את הקריאה של הספרות, ולכן הן מוגדרות תחילה. *חומר חוזר* הוא חומר שהושלך מפתח וחזר אל פני השטח; *נחיתה* היא ההגעה שלו, והמילה "פגיעה" שמורה לגופים חיצוניים; *מכתש* הוא המקום שבו חומר חוזר נחת. המילה "עומק" מסתירה שלושה גבהים, לכל אחד נקודת ייחוס משלו: השפה מעל היבשה, הרצפה מתחת ליבשה, והמרחק מן השפה עד הרצפה, שהוא הסכום של שניהם — כמו קערה ששקועה בשולחן, ששפתה מעל משטח השולחן ותחתיתה מתחתיו. שני מכתשים יכולים לחלוק את הגובה השלישי ולחלק אותו אחרת בין שני הראשונים, והחלוקה הזאת היא מה שקווי האורך מתעדים. השפות אינן שמורות באותה מידה: 43% מן המכתשים ב-90° מערב נופלים במחצית השמורה יותר, לעומת 57% ב-180°, ולכן שפות ורצפות מושוות במחצית העמוקה והשמורה יותר של כל תחום גודל.

חלק B — מה שהסדרה כבר קבעה. המכתשים נוצרו בשלושת השלבים של מאמר 3. בהתעגלות החוצה המכתשים שעל הקליפה השתנו יחד איתה, באופן דומה בכל מקום; בפחיסות נוצרו רוב המכתשים, והגדולים ביותר מחומר קל ועשיר במים; בהתעגלות פנימה הם שמרו על גודלם, והקטבים אספו אותם (מאמר 7 — הקטבים, The Poles). מכתש שנוצר על הקליפה נישא איתה, ואין לחשב אותו מחדש כאילו נוצר בכבידה הירחית של היום. מכתשים בקוטר 5 ק"מ ומטה, שמערבבים נחיתות ראשוניות, גושי חומר נפלט ורסס, אינם מושווים.

חלק C — המכתשים, כמה יש מהם, והמכתש כתייעוד של החומר החוזר. המקור הוא הימות של מאמר 5 יחד עם כיפות ההזנה הקבורות; על גוף האם החומר שלהם נחת במהירויות המעוף, ומאוחר יותר, מן הגוף עצמו, במהירות המילוט של הגוף או פחות ממנה, כ-2.0 ק"מ/ש' בצפיפות 1,300 ק"ג/מ"ק ו-2.3 ק"מ/ש' בשחרור. רוב מה שים משליך נופל בחזרה לתוכו, כמו שרוב הטיפות של סיר שגולש נופלות בחזרה לסיר; הטיפות שנופלות מחוצה לו הן שיוצרות את המכתשים. המכתשים בקוטר 20 ק"מ ומעלה נספרו בארבעה כיפה קוטביתם כדוריים שווים, אחרי הוצאת הימות ו-South Pole-Aitken: 249 למיליון קמ"ר ב-90° מזרח, החצי הנגרר, לעומת 139 ב-90° מערב, החצי המוביל; היחס 1.79 (1.56–2.05) רחוק מאוד מאחד, והעודף נמצא מתחת לכ-70 ק"מ (מחקר 1). הספרות מצפה להפך: עודף בחצי המוביל. מבחן המקור (מחקר 2) מוצא את הברזל של הים בקרקע ובמכתשים, יורד עם המרחק, כמו במאמר 5, והתוריום הולך בעקבותיו, מ-2.16 ppm ליד השפה ל-1.02 בביקורת. סעיף אחרון שואל כמה כבד היה צריך להיות גוף חוזר: על גוף האם, בתאוצת כבידה של 8.25 מ"ש² ובמהירות 5 ק"מ/ש', אותו מכתש דורש בערך פי 7 עד 23 מן המסה של גוף שנוחת במהירות 15 ק"מ/ש' על הירח של היום — רגישות של חוק ההתאמה (scaling law), שכיול של המטרה צריך להפוך למסה.

חלק D — המכתשים, הנראים והקבורים. מכתשים אבדו בשתי דרכים, והמאמר שומר לכל אחת מילה משלה. קבור משמש רק בצד הרחוק: מקור שפעל מוקדם כוסה, יחד עם המכתשים שלו, בשכבות של הצד הרחוק. על 44 הכיפות הקבורות צפיפות המכתשים היא 0.48–0.95 מזו שבטבעת שמסביבו, ולעולם אינה גבוהה ממנה, והמכתשים הגדולים צפופים יותר רחוק מן הימות הנראים (1,040 למיליון קמ"ר מעבר ל-1,000 ק"מ, לעומת 467

בטווח של 150 ק"מ): הם באים מן הכיפות הקבורות ומן הימות הנראים כאחד (מחקר 3). מומס משמש לרצפות של הימות: מכתש שנחת על רצפה פעילה שקע לתוכה ונסגר. מתוך 79 מכתשים בקוטר 10 ק"מ ומעלה על הרצפות, 49 מומסים (62%); על כל 1.2 מיליון קמ"ר של רצפה יש מכתש חד אחד בלבד בקוטר 20 ק"מ ומעלה, 0.8 למיליון קמ"ר, לעומת 207 ברמות (205 במאמר 5, על שטח רמות שונה מעט); על 703,000 קמ"ר של רצפות המגע לא נשאר אף מכתש בקוטר 20 ק"מ ומעלה (מחקר 4). מתחת למכתשים המומסים בסיס הקרום עומד $+0.8$ ק"מ מעל הרצפה שלהם עצמם ב-13 מתוך 16, בלי שפה חדה בכבידה: החומר שקע לתוך הים הנוזלי והתפשט, ולא השאיר גוף בצורת המכתש (מחקר 14).

חלק E — גודל ומצב: הימות והמכתשים בזמן. זהו החלק המשותף למאמרים 5 ו-6, אותו טקסט כמו חלק G של מאמר 5 (לעיל): המחקר העיקרי שלו הוא מחקר 5 כאן ומחקר 8 שם, והמחקר שלו על מישורי המגע הוא מחקר 15 בשניהם. הוא מראה שחלק המכתשים המומסים ברצפות עולה עם הגודל, ושהמכתשים הקטנים של המגע חדים, וקורא את שני הממצאים דרך שני שעונים: התקררות הימות, והחומר מכדור הארץ שהגיע קטן יותר, אם כי עדיין חם, אחרי השחרור.

חלק F — השפה. השפות של 1,457 מכתשים בקוטר 20–100 ק"מ נעקבו לאורך 72 אזימוטים בארבעה כיפה קוטביתים כדוריים, אחרי הוצאת הימות ו-South Pole-Aitken. השפה מתעדת את הכוחות ברגע הנחיתה. סימני הנחיתה הקשה מצביעים על החצי המוביל: במכתשים בקוטר 20–30 ק"מ השפות שלו לא סדירות ברבע יותר מאלה של החצי הנגרר (9.2 לעומת 7.4 אלפיות הקוטר), קופצות יותר בין אזימוטים שכנים (3.9 לעומת 3.5), ומוארכות לעתים קרובות יותר (17% לעומת 12%). השפה מעל היבשה גבוהה ביותר בצד הרחוק, חמישית עד שתי חמישיות מעל זו של החצי הנגרר מעל 30 ק"מ, ונמוכה ביותר בחצי המוביל בין המכתשים בקוטר 20–30 ק"מ. המודל קורא כאן ארבעה כוחות: בצד הרחוק הדחיפה כלפי חוץ של הסיבוב המשותף הרימה את החומר שהושלך למעלה; בחצי המוביל הקרקע רצה לתוכו; בחצי הנגרר הנחיתה הייתה רגילה; ובצד הקרוב, שפנה אל כדור הארץ, אותה דחיפה לחצה אותו מטה. בין שני החצאים, מה שנבדל הוא השפה, לא הרצפה.

חלק G — תחתית המכתש מתחת לקרקע. הרצפה מתעדת את הקרקע שהחומר נחת עליה. במכתשים בקוטר 20–30 ק"מ הרצפה שוכנת 54 אלפיות הקוטר מתחת ליבשה בצד הרחוק, לעומת 27 בצד הקרוב: עמוק בשכבות המרוסקות והמותכות של הצד הרחוק, וקרוב לפני השטח בצד הקרוב, שבו הימות מילאו אותן מלמטה. על הבזלת של הצד הקרוב הרצפות של המכתשים הגדולים המומסים והמרוחים עומדות בגובה הבזלת, לא בעומק של מכתש, ושליש מהן עומדות מעל הבזלת שבחוץ — התרוממות שקפאה לפני שהספיקה לשקוע, דבר שרצפה שהתמלאה מבחוץ לא הייתה יכולה לעשות (מחקר 10). הרצפות הגבוהות עניות יותר בברזל ובטיטניום מן הנמוכות (13.3 לעומת 14.4% FeO במשקל, 1.5 לעומת 2.5% TiO_2 במשקל): הן קפאו עם החומר הקל והעשיר בחומרים נדיפים, ואילו הנמוכות שקעו עם הכבד (מחקר 11).

חלק H — רצפת המכתש. פני הרצפה מתעדים מה הרעיד אותה ומה מילא אותה. במכתשים השמורים יותר בקוטר 20–30 ק"מ הרצפות של החצי המוביל מחוספסות פי 1.5 מאלה של החצי הנגרר, ומכתש אחר מכתש רצפה מחוספסת הולכת יחד עם שפה משוננת, בחוזקה הרבה ביותר ב-90° מערב (מתאם 0.40) והחלשה ביותר ב-0° (0.02): ההלם של הנחיתה. בצד הקרוב החלק של רצפה שטוחה הוא הגדול ביותר בכל תחום גודל: הימות מילאו את המכתשים מלמטה. קריאה שלישית, שלפיה החצי המוביל פגש יותר אבק חלל, חוזה עודף גדול יותר במכתשים הרדודים יותר, ואינה נתמכת.

חלק I — הפסגה המרכזית. הפסגה מתעדת את האנרגיה של הנחיתה. מתחת ל-50 ק"מ החצי המוביל נושא הכי הרבה פסגות, ובבירור הרב ביותר סמוך לגודל הסף (60% מן המכתשים בקוטר 20–30 ק"מ, לעומת 49% בחצי הנגרר); ב-50–100 ק"מ כמעט לכל מכתש יש פסגה; גובה הפסגות הולך אחרי השפות, גבוה ביותר בצד הרחוק ונמוך ביותר בצד הקרוב — הסימן של הסיבוב שהקליפה חלקה עם גוף האם. שפה, רצפה, חספוס

ופסגה יוצרים יחד מחקר אחד (מחקר 6): החצי המוביל נושא את סימני הנחיתה הקשה, בצד הרחוק השפות הגבוהות ביותר והרצפות הנמוכות ביותר, ובצד הקרוב השפות הנמוכות ביותר והרצפות הגבוהות ביותר.

חלק J — המנוע. כדי שיושלך במהירות u , כל קילוגרם צריך $u^2/2$ בפתח: 2, 4.5, 12.5 ו-32 מגה-ג'אול לק"ג במהירויות 2, 3, 5 ו-8 ק"מ/ש'. הלחץ שהרים את החומר העמוק (מחיר ההרמה של 139.78 ג'אה-פסקל במאמר (3) הושקע בהרמה עצמה, כמו שהדחיפה של משאבה מושקעת בהעלאת מים למכל על הגג; אנרגיית ההשלכה חייבת לבוא מהתפשטות החומרים הנדיפים בפתח. נחיתה של חומר על חומר זהה במהירות 5 ק"מ/ש' מניעה את החומר שמאחורי חזית ההלם במהירות 2.5 ק"מ/ש'; על בזלת (מהירות חזית של 3.5 ק"מ/ש' ועוד פי 1.3 מן המהירות הזאת, צפיפות 2,700 ק"ג/מ"ק) לחץ המגע הוא הצפיפות כפול מהירות החזית כפול מהירות החומר, 45.56 ג'אה-פסקל, ו-12.96 ג'אה-פסקל במהירות 2 ק"מ/ש' — מעל הספים שבהם מינרלים של בזלת מתעדים הלם. בדרך חזרה, גוף בקוטר קילומטר שחוצה עמוד אדים של 100 בר שומר על כמחצית ממהירותו. גוש ועננה באותה מסה אינם מוסרים אותו הלם, מפני השטח המקבלים חייבים להיות קשיחים מספיק, עד עומק בסדר הגודל של המכתש, כדי לשמור אותו. כל השלכה מתחת לכ-10.748 ק"מ/ש' נשארת קשורה לגוף האם וחוזרת.

חלק K — הגאומטריה. חומר שמושלך ישר למעלה מגוף אם מסתובב שומר על האנרגיה שלו ועל תנועת הסיבוב שלו; כשהוא חוזר לאותו רדיוס, הכבידה החזירה לו את המהירות שלקחה, והקרקע שמתחתיו מסתובבת באותו קצב, ולכן הוא נוחת בדיוק במהירות ההשלכה שלו. גבוה יותר הוא מסתובב לאט יותר מן הקרקע, כמו מחליקה שמסתובבת לאט יותר כשזרועותיה פרושות, ונוחת מערבה: במהירות 5 ק"מ/ש' הוא מתרומם 1,932 ק"מ, עף 28 דקות ונוחת 1,032 ק"מ מערבה. על מטרה גבוהה יותר מהירות הנחיתה יורדת עם הגובה עד רדיוס הקורטציה — המרחק שבו גוף שמסתובב עם כדור הארץ כבר נע במהירות של מסלול חופשי — כאן כ-15,883 ק"מ, ועולה מעבר לו; לכן מגמה של הלם בזמן שייכת למסלול אחד, ואינה תכונה של המנגנון. גרסאות מוקדמות של הסדרה נתנו תקרות הלם של 113 ו-97 ג'אה-פסקל ומגמה מ-102 ל-86 ג'אה-פסקל; קריאת המעופות מסלול אחר מסלול הראתה שהן תקפות למשפחה אחת של מסלולים בלבד, והן אינן נטענות עוד. הסעיף האחרון פונה אל החומר הנפלט של הגוף עצמו: כשהוא מושלך מן החצי הנגרר, הוא נופל בחזרה בזמן שהקרקע מתרחקת ממנו, ונוחת ברכות; מן החצי המוביל הקרקע ממשיכה לנוע לתוכו והנחיתה קשה, כמו רץ שפוגש את הגשם בפניו ולא בגבו; מן הצד הרחוק הוא נופל בחזרה לכיוון 170° מזרח עד 100° מזרח. לכן החצי הנגרר מחזיק הכי הרבה מכתשים, והחצי המוביל את הקשים ביותר.

חלק L — הכימיה. מסביב לכל ים הברזל והטיטניום שלו גבוהים ביותר בסמוך אליו ויורדים כלפי חוץ, עם עודף עד 600 ק"מ, פי עשרה ויותר מטווח הערבוב הצידי בידי מכתשים מאוחרים (מחקר 2, כאן במלואו). המכתש עני יותר מן הקרקע שלו משום שהשליך את הציפוי הצידי. גם התוריום יוצר הילות סביב הימות, אבל המפה שלו גסה מדי בשביל מכתשים בודדים. בתוך המכתש, מן המרכז אל השפה, מונח אותו חומר בכל קו אורך, זהה בחצאים שבהם הנחיתה הייתה קשה ובאלה שבהם הייתה רכה (מחקר 7): המכתש מלא בחומר החוזר שיצר אותו. אם קוראים אותם כגופים חיצוניים, המכתשים הנראים דורשים 4.4×10^{19} – 5.0×10^{19} ק"ג של מסה זרה, שני שלישים ממנה בשביל South Pole–Aitken לבדו; בשיעור השימור של הספרות זה משאיר 2%–6 מ-5 הק"מ העליונים של הקרום (גרסה מוקדמת נתנה 2%–5%), שמכילים לכל היותר 0.9%–2% — עד פי 6.7 פחות מן הנדרש; ההפצצה כולה של הספרות דורשת 3.7×10^{20} ק"ג, לעומת 2.1×10^{19} – 2.7×10^{19} בקרום ובמעטפת יחד, פי ארבעה-עשר עד שמונה-עשר יותר, ואיזוטופי הרוטניום של התכות המכתשים, במקומות שבהם נמדדו, הם של כדור הארץ (מחקר 8). החומר הנפלט של המכתשים שעל הבזלת עני יותר בברזל מן הבזלת, כפי שדורש החומר הקל יותר שכדור הארץ יכול היה להשליך אחרי השחרור (מחקר 12). המכתשים הקטנים והטריים בקוטר 1–2 ק"מ רבים פי 1.19 בצד הקרוב מאשר בצד הרחוק, ואילו המכתשים הישנים יותר בקוטר 10–20 ק"מ רק מחצית מהם שם: כדור הארץ, שנמצא תמיד בשמי הצד הקרוב, היה המפזר האחרון (מחקר 9).

חלק M — תיארוך. המאמר מסדר את אוכלוסיות המכתשים בלי להמיר ספירות לשנים: תחילה המכתשים שנקברו עם המקורות של הצד הרחוק; אחר כך המכתשים שנוצרו בזמן שהגוף היה מחובר, ועלו עם הקליפה;

אחר כך המכתשים שנחתו על רצפות הימות הפעילות ונמסו; ואחרונים, המכתשים החדים על הרצפות הקפואות והמכתשים הקטנים והטריים על היבשה. האוכלוסייה האחרונה היא החומר שנלכד אחרי השחרור: עם השחרור הלחץ של כדור הארץ חדל להגיע אל הירח והפליטות של הירח עצמו נפסקו, ואילו כדור הארץ המשיך להשליך טיפות קטנות ובינוניות, שחלקן נמשכו אל הירח. חומר מכדור הארץ הגיע במהירות של כמה ק"מ/ש' ועוד מהירות המילוט של הירח עצמו, 2.4 ק"מ/ש' ברדיוס של היום (2.3 ק"מ/ש' בשחרור), ולא ב-15–20 ק"מ/ש' של אסטרואיד, והוא עשוי מן החומר של כדור הארץ. מכאן החיזויים לימות: מכתשים קטנים ביחס למסה שיצרה אותם, הלם מתחת לתחום האסטרואיד, והיעדר ניגוד בהרכב בין הגוף החוזר לבין הקרקע שעליה נחת.

חלק N — סטטיסטיקה. הצורות נמדדו על 1,457 מכתשים בקוטר 20–100 ק"מ במודל הגבהים SLDEM2015 ברזולוציה של כ-60 מ', והושוּו רק בתוך אותו תחום גודל ואותו כיפה כדורית (cap). פסגות ורכסים נקראים לפי כללים קבועים שנקבעו לפני ההשוואה, ומיושמים באופן זהה על כל אזור. רווחי הסמך הם רווחי bootstrap; הספירות של מחקרים 1 ו-9 נדגמו מחדש גם לפי תאים שלמים של 5° על 5°, כדי שמכתשים שמקובצים סביב מקור אחד לא ייספרו כבלתי תלויים, והן נשארו רחוקות מאחד. הכימיה נקראת מול פיזור הכיול של המפות, FeO 0.81% במשקל ו-TiO₂ 0.43% במשקל.

חלק O — חיזויים ומבחנים. מוצגים ארבעה-עשר מבחנים ממוקדים, כל אחד עם הטענה שלו והמדידה שלו: ביניהם ההשלכה והמעוף, המגמה בסדרת אירועים, המקור הארצי, הימות כמקור, טבעת הרסס הפעיל, כיפות ההזנה הקבורות, קווי האורך, המסה הזרה החסרה, והתיעוד שנישא על הקליפה. ארבעה-עשר מחקרים מפורטים, אחד-עשר ירוקים ושלושה כתומים. במחקר 6 חלק מרווחי הסמך של השפות של המכתשים הגדולים יותר כוללים את האפס; במחקר 11 הפרש הברזל, כשקוראים אותו מול הבזלת שממש מחוץ לכל רצפה, אינו מעבר למקרה; במחקר 12 המכתשים שנשארו בתוך הבזלת עדיין אינם מפרידים בין הקריאה של המודל לזו של הספרות. המספור משותף עם מאמר 5: מחקר 5 כאן הוא מחקר 8 שם, מחקר 15 הוא אותו מחקר בשניהם, ומחקר 13 של המאמר הזה (כמו מחקר 14 של מאמר 5) בוטל, ושאר המספרים נשמרו.

חלק P — דיון. התיעודים של המאמר מספרים תהליך אחד בשלושה תיעודים: היכן החומר נחת, דבר שנקבע בסיבוב של הגוף המחובר; כמה חזק נחת, דבר שנכתב במרכז ובשפה; ועל איזו קרקע נחת, דבר שנכתב ברצפה. החצי הנגרר נושא פי 1.4 עד 1.8 מן המכתשים הגדולים של החצי המוביל; שטף מבחוץ היה נותן עודף של כמה עשרות אחוזים בחצי המוביל, ולא היה מסביר את המכתשים העדינים יותר של החצי הנגרר, ואילו החומר הנפלט של הגוף עצמו נותן את שניהם. התפלגות הגדלים של המכתשים נשארת אילוף שיש לעמוד בו, על ידי העברת הגדלים והמהירויות של החומר המושלך דרך התפרקות, נחיתה, רוויה וקבורה. מה שחדש כאן הוא ההבדל בין מהירות החזרה לבין מה שהמקור יכול להשליך, המהירות ביחס לפני שטח מסתובבים, והכבידה והאדים של גוף האם כחלק מן התנאים של המכתש.

חלק Q — מסקנות. תשע מסקנות, חמש על הפיזיקה וארבע על התיעוד: גוף חוזר נוחת מהר כמו שהושלך; במהירויות 2–5 ק"מ/ש' הנחיתה יוצרת 13–46 ג'יגה-פסקל; המקור חייב להשליך מהר, והחומר חייב לחצות את האדים ולהגיע שלם; מגמה או תקרה של הלם שייכות למסלול, לא למקור; מכתש שנוצר על גוף האם חייב להיות מחושב בכבידה של גוף האם, כ-8.25 מ"ש², פי חמישה מזו של הירח היום; המכתשים אינם נושאים מסה זרה; הימות הם המקור, ומכתשים אבדו בקבורה בצד הרחוק ובהתכה על רצפות הימות; ושני החצאים מתעדים את ההשלכה של הגוף עצמו. המבחנים של חלק O מכריעים את הייחוס מדידה אחת מדידה.

נספח — שחזור ומפת החידוש. טבלת המעוף מחושבת מחדש צעד אחר צעד כקטע של אליפסת Kepler מרדיוס השלכה של 6,721 ק"מ: הציר הראשי-למחצה, האקסצנטריות והתנועה הממוצעת, זווית היציאה, זמן המעוף, והנחיתה מערבה כהפרש בין הזווית שפני השטח מסתובבים לבין הזווית שהחומר עובר. אין תקרת מעוף כללית של 44 שעות; קרוב לאנרגיית המילוט המעוף מתארך בלי גבול. מפת החידוש מפרידה בין ידע קודם (מכתשים משניים, העברת חומר מכדור הארץ לירח, הלם וחוקי התאמה של מכתשים), לבין ההשערה של

המודל (השלכה פנימית אל הקליפה של הגוף המחובר לאגס), לבין החישובים של המאמר עצמו, ומציבה את הייחוס של המכתשים הנצפים יחד עם המבחנים של חלק O.

C.7 מאמר 7 — הקטבים (The Poles)

הטענה

בקטבי הירח יש יותר מכתשים ליחידת שטח מאשר במשווה שלו, משום שהירח הצעיר נפחס בסיבובו המהיר בזמן שעמד על האגס, קיבל את מכתשיו באופן אחיד על הצורה הפחוסה הזאת, ואחר כך התעגל בנפח קבוע בעודו מחובר, כך שפני השטח הקוטביים שלו נסגרו והמכתשים שעליהם נאספו אל שני קצות ציר הסיבוב. הצפיפות הצפויה אינה מספר אחד אלא טווח שעולה עם גיל המכתשים — כ-1.6 למכתשים שנוצרו בשיא הפחיסות, כ-1.2 לאלה שנוצרו מאוחר בשלב החיבור, 1.0 לאלה שנוצרו אחרי השחרור — והספירה הנקייה, כשהימות ו-South Pole–Aitken מוסרים משני הצדדים, נותנת 0.05 ± 1.20 , ועולה עם גודל המכתש מ-1.09 ל-1.53.

חלק A — התצפית. חלק A מודד, לפני כל הסבר, היכן נמצאים המכתשים. הספירות נעשות בקטלוג של Robbins (2019), מכתשים של 20 ק"מ ומעלה (6,973) ושל 40 ק"מ ומעלה (2,329). צפיפות היא תמיד מספר מכתשים חלקי שטח, כך שאפשר להשוות אזורים שגודלם שונה מאוד. בספירה הגולמית, הכיפות הקוטביות ברדיוס 30° סביב שני הקטבים מכילות 219 מכתשים למיליון קמ"ר, מול 166 ברצועה המשוונית $|\phi| < 15^\circ$ — יחס של 1.32, ו-1.51 במכתשים של 40 ק"מ ומעלה; הרצועה הצמודה לקוטב הצפוני מגיעה ל-300 (פי 1.80 מן המשווה). בחיתוך לפי קו אורך הירח אף פחות אחיד (84 עד 251, פי 2.97), אבל זהו דפוס נפרד, של מזרח–מערב: רצועת רוחב מכילה את כל קווי האורך, ולכן יש להחזיק את שני הפרופילים בנפרד. הסרת האגנים והימות מצמצמת את הטווח לפי קו אורך ל-1.68, ומשאירה את הצפיפות הקוטבית במקומה. המסכה היא 20 האגנים של 500 ק"מ ומעלה ופוליגוני הימות של LROC; השטח שלהם מוסר מן המכנה, והמכתשים שלהם מן הספירה — כמו שסופרים עצים להקטר על היבשה, ולא על פני הבריכה. לאחר המסכה, שתי הרצועות הצמודות לקטבים עומדות על 305 (דרום) ו-300 (צפון).

כיפות שהרדיוס שלהן הולך וקטן מראות כיצד העודף מסודר. סביב הקוטב הצפוני, שבו אף אגן או ים אינו מגיע לטווח של 20° ממנו, הצפיפות עולה מ-189 בכיפה של 60° ל-300 בכיפה של 15° , ונשארת 298 בכיפה של 10° . הדרום נראה שטוח בספירה הגולמית רק משום ש-South Pole–Aitken תופס אותו; לאחר הסרת האגן גם הוא עולה לעבר הקוטב שלו (305 ב- 15° , 348 ב- 10° , על בסיס 36 מכתשים). בשני הספים העודף גדול יותר במכתשים הגדולים.

בספירה בכיפות שוות של 30° סביב ששת הקצוות של שלושת צירי הירח, לאחר המסכה, הנקודה התת-ארצית היא הדלילה ביותר (148), הנקודה המובילה אחריה (174), הקטבים והצד הרחוק מעליהן (221–246), והנקודה הנגררת הגבוהה ביותר (252): זה הסדר של גוף שנפחס בסיבובו ונמתח בידי הגאות לאורך הקו אל כדור הארץ. העודף בצד הנגרר (1.45 בכיפות, כחמש סטיות תקן של ספירה, אבל רק כאחת ברצועות שמקוטב לקוטב) נמצא סביב 90° מזרח, בצד שנושא יותר ימות משלו. המודל קורא אותו כחומר חוזר מן הפתחים, שנוחת סביבם, $N_{\text{obs}} = N_{\text{background}} + N_{\text{return}} - N_{\text{erased}}$; הקשר בין שטח הימות לבין המכתשים הוא דרישה.

בתוך South Pole–Aitken, הטבעת שבטווח 10° ממרכזו מכילה 132 מכתשים למיליון קמ"ר, 0.59 מן הצפיפות בשטח שממש מחוץ לשפתו; הממצא נמדד כאן ומועבר למאמר 8. ההשוואה שעליה נשען המאמר היא שווה מול שווה: הימות (22% מן החגורה, 1% מן הכיפות) מורידים את הצפיפות במשווה ומנפחים את היחס, ו-South Pole–Aitken (24% מן הכיפות) מוריד את הצפיפות בקטבים. כששניהם מוסרים משני הצדדים, היחס יורד

מ-1.32 ל- 1.11 ± 0.04 (בלי הימות) ול- 1.20 ± 0.05 (בלי הימות ובלו South Pole–Aitken). המספר שאחרי $\pm$ הוא סטיית תקן ספירית אחת; ברמת ביטחון של 95% היחס הנקי נמצא בין 1.10 ל-1.30 (גרסה מוקדמת קראה את ה- $\pm$ כרווח של 95%).

חלק B — מה ניסינו לפני התשובה. שש קריאות נבדקו והונחו בצד. כל אחת הועמדה מול ארבע שאלות, בסדר הזה — הסימן, הגודל, הצורה לאורך הציר, ועמידות בפני המסכה — וכל אחת השאירה משהו לחשבון. שימור על רמות עתיקות הוא תופעה אמיתית, והוא מסדר את הירח בקנה מידה גדול (219, 164 ו-99 מכתשים למיליון קמ"ר בצד הרחוק, בחגורת השוליים ובדיסקת המגע), אבל העודף שורד את המסכה, הכתר של הצד הרחוק (221) עומד מתחת לקטבים, ולקוטב הצפוני יש מרכז. פחיסות סיבובית של פני שטח שכבר נשאו מכתשים נותנת את הסימן ההפוך: היא נותנת $c/a = \rho_{\text{pole}}/\rho_{\text{equator}}$, כלומר 0.83 ו-0.59 עבור הצורות של שלב החיבור. מאחורי הקלעים, כאן השתנתה השיטה: מחיפוש אחר מה שיוצר פחיסות לחיפוש אחר מה שמבטל אותה. גם המתיחה הגאותית אל צורת רוש (0.601:0.637) מדללת את הקטבים ומצופפת את הנקודה התת-ארצית, ההפך מן הספירות; הצורה הזאת נשמרת כצורה שיש לבטל. כבידה חזקה יותר בקוטב אינה מזיזה דבר הצידה: בגוף מסתובב הקוטב הוא ראש גבעה של הפוטנציאל האפקטיבי, כ- 1.6×10^5 ג'אול/ק"ג, או 120 ק"מ, מעל המשווה, והוא הופך למנוע רק כשהגוף המתהדק אינו יכול עוד לשאת את הפחיסות שלו. בור בקוטב היה דורש שיא בנקודה, אבל הצפיפות בצפון מתיישרת בתוך 15° , וכל כוח של גוף מסתובב סימטרי סביב הציר, ולכן יוצר טבעת, לא נקודה. שינוי גודל אחיד משאיר כל יחס על 1.00. מה שנשאר הוא שינוי צורה אחד: גוף פחוס שחוזר לצורת כדור. הוא עובר את ארבע השאלות, והוא לבדו גורם לעודף להיות תלוי בגודל המכתש.

חלק C — המנגנון. גוף רך מסתובב מקבל את צורת Maclaurin, שהשטיחות שלה תלויה רק בסיבוב ובצפיפות: הקשר בין $\Omega^2/\pi G\rho$ לבין האקסצנטריות עולה למקסימום של 0.4493 ($a/c = 2.72$), ובסיבוב של 5.5 שעות שום גוף נוזלי שצפיפותו נמוכה מ-1,070 ק"ג/מ"ק אינו יכול להחזיק את עצמו. כשהגוף החזיק את עצמו לראשונה, בגבול רוש הקשיח לצפיפות 1,300 ק"ג/מ"ק (12,994 ק"מ; 10,314 ק"מ בצפיפות 2,600), הוא הסתובב עם כדור הארץ פעם ב-5.5 שעות, ויחס הצירים שלו היה 1.69. כשהתהדק על האגס, אותו סיבוב יכול היה להחזיק פחיסות קטנה יותר (1.44, 1.30, וכ-1.20 מאוחר בשלב החיבור, כש-71% מן הפחיסות כבר נעלמו), ובזמן השחרור הוא היה עגול, והקליפה שלו קשיחה (יחס צירים של 1.04 לכל היותר, מאמר 2 (LEF Mechanism in Principle), (B.7§) — דרישה של המודל, שאינה מחושבת במאמר הזה. הצורה הגאותית החופשית בצפיפות 2,600 ק"ג/מ"ק (0.601:0.637 במרחק 20,595 ק"מ, מעט מעבר לגבול רוש הנוזלי של כ-20,000 ק"מ לצפיפות הזאת) משמשת רק להמחשת חלקה של הגאות; בשחרור, ב-16,400 ק"מ, אין צורה נוזלית, והגוף מוחזק בידי הקליפה הקשיחה שלו.

כשצורה פחוסה מתעגלת בנפח קבוע, פני השטח הקוטביים מתכווצים בגורם $(c/a)^{2/3}$ ופני השטח המשווניים נפתחים בגורם $(a/c)^{1/3}$, כך שמכתשים שנוצרו באופן אחיד מגיעים לסוף כשהם צפופים בנקודת הקוטב, ביחס למשווה, בדיוק פי a/c . בממוצע על כיפות של 30° מול החגורה, הגורמים הם 1.26, 1.38, 1.59 ו-1.17 עבור צורות של 1.69, 1.44, 1.30 ו-1.20. הקטבים הם הנקודות העומדות משום שציר הסיבוב עובר דרכם: כל קו אורך חוזר אליהם כשהפחיסות נרגעת, כמו חישורים שנפגשים בטבור הגלגל, וכל הטבעת שנמצאת 90° מן הנקודה התת-ארצית מצטופפת, והקטבים יותר מכול. ההתהדקות מ-1,300 ל-3,344 ק"ג/מ"ק מכווצת כל אלמנט באותה מידה (0.53) ואינה משנה אף יחס. המנוע הוא הכבידה של הגוף עצמו, שגדלה ככל שהוא מתהדק — $\Omega^2/\pi G\rho$ יורד מ-0.37 ל-0.17 כמעט באותו סיבוב — וההתעגלות משחררת $2-3 \times 10^{27}$ ג'אול, 2.4% מאנרגיית הקשר, די לחמם את הפנים ב-30–40 קלווין.

הקליפה הקשיחה, שנמתחת בעשרה עד עשרים אחוזים, הייתה נושאת 2–12 ג'יגה-פסקל מול חוזק של כ-0.1 ג'יגה-פסקל. הלחץ בורח דרך פתחי הימות הקיימים, והחומר שנזרק החוצה חוזר ונוחת כמכתשים: בעוצמה כשהצורה פחוסה ביותר, ובחולשה מאוחר יותר — מכתשים גדולים מוקדם, קטנים מאוחר — כך שגודל המכתש הוא שעון. לאורך ציר הזמן, מדד הגאות $k = M_\oplus/\pi\rho r^3$ יורד מ-2.01 בשלב חצי הכדור ומ-0.67 בתחילת

ההתעגלות ל-0.17 בשחרור, ואף פעם אינו יורד מתחת לסף הנוזלי של 0.09. הבסיס, שהצטמצם מ-6,000 ל-3,000 ק"מ, נשא את מה שהכבידה של הגוף לא יכלה לשאת, ובתחילת ההתעגלות הכבידה האפקטיבית בשני קצות הציר הגאותי הייתה שלילית. הגוף לא החליק מן הבסיס ברכות: הוא נמשך ממנו בכוח מעט אחרי שמרכז המסה שלו הגיע אל קו הקורוטציה — המרחק שבו גוף שמסתובב עם כדור הארץ כבר נע במהירות של מסלול חופשי — כ-210 ק"מ מעבר לו, שם החודש נולד שווה ליום (5.77 שעות).

בציר הזמן המשוער של הסדרה מפרידים כ-600 מיליון שנה בין תחילת הבליטה לבין השחרור, לפני 3.873 מיליארד שנה — כ-400 מיליון שנה לבליטה ולאגס, כ-100 מיליון שנה של פחיסות, וכ-100 מיליון שנה של התעגלות פנימה — ולכן את קצב ההתעגלות הכתיבה ההתהדקות, לא הרפיה. הצורה התקבעה הרבה לפני 16 רדיוסי כדור הארץ (מאמר 4 (The Orbit), C.3§), והפחיסות המאובנת של היום, $f \approx 0.001$, קטנה פי ארבע מאות מן ה-0.4 של השיא. הדרישות מן החומר של שתי השכבות נפגשות בדרישה אחת: פנים בצמיגות 10^{21} – 10^{22} פסקל-שנייה שעוקב אחר צורתו בתוך 10^3 – 10^4 שנים, מתחת לקליפה בצמיגות 10^{23} פסקל-שנייה ומעלה (הקליפה שמאמר 3 (LEF Mechanism in Practice) דורש כדי לשמור את המכתשים שנוצרו על כדור הארץ), שעליה המכתשים נישאים שלמים, כמו אריחים ברצפה שנדחקים זה אל זה בתפרים: מתקצרת לעבר הקטבים ונסדקת לעבר המשווה.

חלק D — מבחנים. חמישה מבחנים נקבעו, עם קווי המעבר שלהם, לפני הספירות; כל יחס ניתן עם רווח סמך של 95% (בינומי מדויק לספירות, ו-bootstrap של 20,000 דגימות חוזרות לחציונים). *יחס הצפיפות:* החיזוי 1.1–1.6, המדידה 0.05 ± 1.20 בספירה הנקייה (רווח 95%: 1.10–1.30); מתחת ל-20 ק"מ לא נעשית השוואה, משום ששם שולטים מכתשים משניים, רסס ורוויה. *שעון הגודל:* היחס עולה עם הקוטר — 1.09 (20–30 ק"מ), 1.15 (30–40), 1.26 (40–60), 1.53 (60–100), 0.38 ± 1.84 (100–300) — וכשקוראים אותם לאחור דרך הגאומטריה של חלק C, הם מצביעים על צורות של 1.10, 1.17, 1.31, 1.63 ו-2.00; המכתשים של 60–100 ק"מ משחזרים את השיא של 1.69, שחושב מן הסיבוב והצפיפות בלבד. משום שבחוק הגדלים $b \approx 2$, מכתשים שהיו מתכווצים יחד עם פני השטח היו מסתירים את הצפיפות בכל סף קבוע; העודף שנמדד הוא עצמו הסימן לכך שהם שמרו על גודלם, ובאותו סף החציון הקוטבי הוא הגדול יותר, 1.06 (1.01–1.12). מאחורי הקלעים, קריאה מוקדמת יותר הניחה שהמכתשים הקוטביים התכווצו ב-9%, והשוותה חציונים בסף מונמך; ההשוואה הזאת מדדה את הסף, והמאמר הולך בעקבות הקליפה הקשיחה. *המכתשים הצעירים,* שנוצרו על הגוף העגול, חייבים שלא להראות עודף: 0.92 במכתשים הקופרניקיים של מאגר הנתונים של LPI, ו-1.12–1.16 במדגם המתוארך פיזיקלית של Mazrouei ועמיתיו (2019) — מתיישב עם 1.0, אבל מעט מדי כדי לשלול 1.2 (הסתברויות של 0.22–0.52); כדי להפריד בין השניים נדרשים כ-150 מכתשים צעירים מתוארכים בכיפות ו-300 ברצועה. האוכלוסייה הצעירה אחידה גם לפי קו אורך (3.11 מול 2.84 למיליון קמ"ר, הצד הרחוק מול הקרוב), ולכן מה שציפף את המכתשים הוותיקים פסק לפני שהצעירים נוצרו. *צפון ודרום:* לאחר המסכה, יחס דרום לצפון הוא 1.02 (0.78–1.32) ב-15° ו-1.02 (0.94–1.10) ב-60° — שוויון בתוך כל רווח. *חמישה מבחני גודל* שואלים אם המכתשים הקוטביים התכווצו בגורם 0.79 שהעיוות היה נותן: המכתשים הגדולים ביותר לשטח שווה גדולים יותר בקטבים, 1.16 (1.04–1.29); הדבשת של התפלגות הגדלים נשארת ב-80–113 ק"מ, עם גורם קנה מידה של 1.09 לפחות; מכתשים ותיקים מול טריים נותנים יחס כפול של 1.02 (0.89–1.16); האליפטיות בקווי רוחב בינוניים עולה על זו של הכיפות והחגורה בכ-0.01, עשירית ממה שהעיוות היה משאי; והמעבר ממכתש פשוט למכתש מורכב נותן 16.4 או 14.0 ק"מ בכיפות מול 16.8–16.9 בחגורה, כשהתכווצות חוזה כ-13. ארבעה מוצאים שהגודל נשמר; אף אחד אינו מוצא את ההתכווצות.

חלק E — מה שנותר. תהליך אחד מסביר שש תצפיות, כל אחת עם מספר שחושב לפני הספירה: העודף הקוטבי ועלייתו עם הגודל, החציון הקוטבי הגדול יותר, השוויון בין שני הקטבים, הסדר של ששת קצות הצירים, היעדר עודף בין המכתשים הצעירים, ושחזור הצורה הפחוסה ביותר מן המכתשים הגדולים ביותר. חמש תצפיות נמדדו אך לא נגזרו, ונאמרות ככאלה: העודף בצד הנגרר (1.96 גולמי, 1.45 לאחר המסכה), שהקשר שלו

לפתחים סביב 90° מזרח ממתין לחישוב של הפליטה והחזרה; הכתר של הצד הרחוק, צפוף (221) במקום שהגאומטריה מבקשת בו פחות, שמנוסח כדרישה שהכתר של הכיפה לא התכווץ כקצה חופשי; מכתשים קוטביים של 20–100 ק"מ רדודים יותר מאלה שבמשווה (יחס עומק לקוטר של כ-0.062 מול 0.074 ב-20–30 ק"מ); התיישרות לאורך קווי האורך של המכתשים המוארכים ביותר בקווי רוחב 30° – 60° (45%–51 מול 20–25%), כשהתאורה של התמונות היא החשוד הראשון; והמרכז דל המכתשים של South Pole–Aitken, שמועבר למאמר 8. העבודה הבאה הופכת דרישות לחישובים: הצורה של גוף בעל חוזק; רשימה מאומתת וגדולה יותר של מכתשים צעירים (הטבלה שפרסמו Mazrouei ועמיתיו ו-1,615 המכתשים בעלי הקרניים של Werner ו-Medvedev); פתרון ההרפיה הדו-שכבתית לאורך שלב החיבור; הלחץ הכלוא בזמן הניתוק; חלקה של הגאות בצפוף, על גוף שמוחזק בידי הבסיס שלו; המרווחים בין המכתשים הקוטביים כמדד ישיר להתכווצות; מבני הקיצור והמתחה שהקליפה הייתה אמורה להשאיר; תפוקת המכתשים מן הפתחים סביב 90° מזרח ו- 90° מערב; והכיפות הפנימיות ביותר, עם הקטלוג הבא, מתחת ל-20 ק"מ.

C.8 מאמר 8 — South Pole–Aitken

הטענה

המרכז דל המכתשים של South Pole–Aitken רושם מקור חום מתחת לצד הרחוק — הברנר — ממול לפתחים של הצד הקרוב, עם שתי יציאות, Imbrium הראשית ו-Serenitatis המשנית. בזמן שהגוף היה מחובר החום בא מכדור הארץ ונכנס דרך Imbrium ו-Serenitatis; אחרי השחרור היה זה החום של הירח עצמו, יחד עם הקרינה של כדור הארץ הקרוב, שנחלשה ככל שהירח התרחק, והכול התקרר לאט. החום שלו הגיע אל פני השטח במקום שבו הקרום היה דק: האזור התרומם לכיפה שהקרום המרוכך שלה גלש החוצה, חומר נדיף ואף חומר עמיד לחום גורש ממנה, שכבות החומר החוזר נצלו ונדחסו, חומר עשיר בברזל מפנים כדור הארץ הגיע אל הבסיס, וכשהחום נרגע הכיפה התקררה וקרסה אל האגן שנראה היום. הכיפה נמצאת מדרום לשתי היציאות, כיוון שנקבע בידי האגס והסיבוב, והמעבר מן הצורה הפחוסה לכדור הגדיל את המרחק מ- 17° – 21° ל- 24° – 29° של היום.

חלק A — מבוא: האגן והחידה שלו. South Pole–Aitken (SPA) הוא האגן הגדול ביותר על הירח, כ-2,400 על 2,050 ק"מ, וקרקעיתו נמצאת 6–8 ק"מ מתחת לרמות שמסביב — השטח העמוק ביותר על הירח, והאגן הגדול העתיק ביותר שעוד אפשר לזהות (כ-4.25 מיליארד שנה, לפי הדגימות ממנו). Chang'e-4 נחתה על קרקעיתו, ו-Chang'e-6 החזירה ממנו את הדגימות הראשונות מן הצד הרחוק. המכתשים הם השעון של הירח, ופני שטח עתיקים כל כך היו צריכים להיות מלאים בהם; המרכז שלו אינו כזה. בספירה בטבעות מן האמצע כלפי חוץ, על שטח שנוקה ממישורי הלבנה ומן הימות, המרכז מכיל כמחצית מן המכתשים שבשטח שממש מחוץ לשפה; המקום שבו הם המעטים ביותר — המינימום — נמצא כ-270 ק"מ צפון-מזרחית למרכז, והמכתשים שנשארו רדודים, מתחת לשפות גבוהות. האגן מובחן גם ברשומות אחרות: קרום דק שמוקף קרום מעובה, קרקעית עשירה בברזל ובתוריום עם מעט לבה נראית, מסה צפופה עמוק מתחתיו, מעטפת יבשה ודלה בחמצן, התכה שעלתה במשך כשני מיליארד שנה, ומגנטיות קרומית חזקה בשוליו. הקריאה המקובלת היא פגיעה אלכסונית ענקית לפני כ-4.25 מיליארד שנה — מצפון ברוב הקריאות, ולכיוון דרום אצל Andrews-Hanna ועמיתיו (2025) — כשלכל תכונה ניתן הסבר משלה. שישה דברים נשארים לא מוסברים או מוסברים בדוחק: גירעון מרכז במרכז שמתחדד כשמסירים את הלבנה; מיקומו מחוץ למרכז ואובדן הגדלים הבינוניים שבו; מיעוט הלבנה בקרום הדק ביותר; אסימטריה של הטבעת לאורך מזרח-מערב ולא לאורך צפון-דרום; טווח של התכות לאורך שני מיליארד שנה; ושדה שחלש במינימום. המודל מציע במקומם תהליך אחד. הברנר הוא חום מפנים כדור הארץ שחצה את הגוף המחובר לאורך קו הפתחים והתרכז מתחת לצד הרחוק, וחימם את הקרקע מלמטה

כמו שלהבה מחממת את תחתית הסיר. בזמן הברנר SPA היה במרחק של כ-27° מן הקצה הרחוק של הגוף המוארך — הנקודה שממול מרכז המגע — ועל הכדור של היום אותו מרחק נקרא כ-39.5° (דרומה 22° ← 33°, מזרחה 15° ← 22°). זהו שינוי הנובע מן המעבר מן הצורה הפחוסה לכדור, ולא תנועה על פני השטח (גרסה מוקדמת, שמדדה מן הנקודה שממול נקודת הייחוס הישנה 23° צפון, 320° מזרח, נתנה 34°–36° ← 48.6°). יחס של נקודה אנטיפודית שורד גם את הסיבוב של הגוף וגם את ההתעגלות שלו, כך שנקודה והנקודה שממולה עדיין פונות זו אל זו דרך המרכז.

חלק B — האנומליות של SPA (סקירה). חלק B עובר על האנומליות אחת אחת, כל אחת בשישה צעדים: מה נמדד ובידי מי; מדוע זה מוזר; מה אומר המדע; היכן הוא אינו מספיק, ובסוף הכרעה (מסביר, מסביר בחלקו, מסביר בקושי, אינו מסביר); מה אומר המודל; וכיצד המדידה מתאימה לו, ובסוף הכרעה משלה (מתאים, מתאים בחלקו). שתי ההכרעות עומדות בתיבות נפרדות, ואף אחת מהן אינה משווה את עצמה לאחרת. במקום שבו המאמר ביצע את המדידה בעצמו, אחריה בא מחקר בשבעת הצעדים של דוח מחקר (מחקרים 1–5). כל השוואות המכתשים הן שווה מול שווה, על שטח עתיק: מישורי הלבנה של מפת 34, LROC הימות של מאמר 5 (The Maria) עם הליבה של כיפת ההזנה מתחת לכל אחד מהם, והילה של 200 ק"מ סביב כל ים — כל אלה מוסרים מן הספירות ומן השטחים בשני הצדדים, וכל צפיפות מחולקת בצפיפות של הטבעת שממש מחוץ לשפה (39.57°–50° מן המרכז שב-53° דרום, 191° מזרח).

B1 — רשומת המכתשים (מחקר 1). SPA כולו מכיל 7% פחות מכתשים של 20 ק"מ ומעלה משאר הירח על אותו סוג שטח (213.9 מול 230.2 למיליון קמ"ר), ו-11% פחות משטח באותם קווי רוחב, והחוסר יושב במרכז: 0.51 מן הצפיפות החיצונית בטווח 10°, 0.81 בטבעת הבאה, וכתשע עשיריות מ-20° והלאה. ככל שהשטח נקי יותר, הגירעון חזק יותר (0.59 על כל השטח, 0.56 בלי מישורי הלבנה והימות, 0.51 גם בלי ההילות), ולכן פני שטח צעירים מטשטשים אותו ואינם יוצרים אותו; הוא שורד גם על האליפסה של האגן (122–132 בליבה). מפת צפיפות רציפה ממקמת את המינימום ב-45.4° דרום, 197.9° מזרח, בעוצמת רשומה של 0.45, על קו האורך של הנקודה שממול ל-Serenitatis (197.9° מול 198.8°), ו-212 ק"מ מאתר Chang'e-6; העניים ביותר מבין שמונה גזרות הם הצפון-מזרח והצפון. הגדלים הבינוניים חסרים יותר מכול (0.47 ב-20–40 ק"מ, 0.91 ב-10–20 ק"מ; 4.62 מכתשים קטנים לכל מכתש גדול יותר במרכז, מול 2.13 במקומות אחרים), והמכתשים של 40–80 ק"מ ב-20° המרכזיות רדודים ב-18% מאלה שבחגורת השפה (4%–33%), ושפותיהם גבוהות יותר מאשר בביקורת מותאמת (1.35 מול 0.92). המדע: אינו מסביר. המודל: מתאים — חום מלמטה מחק את המכתשים והרפה אותם, מכתשים מאוחרים יותר נחתו על קרקע דחוסה עם שפות גבוהות, ורסס מאוחר של שברים קטנים נפל מעליהם.

B2 — צורה ועומק (מחקר 2). SPA הוא האזור הנמוך ביותר על הירח: הקרקעית שבין המכתשים שלו נמצאת ב-4.8–9 ק"מ, ו-6–9 ק"מ מתחת לשפתו, לפי האופן שבו מגדירים את השפה. במדידה רק על השטח שבין המכתשים (כל מכתש של 20 ק"מ ומעלה מוסר עם שוליים, ויחד איתם הפתחים — 36 הסימנים המקוריים של הסדרה), האגן עמוק ממה שהקרום הדק שלו מסביר באיזוסטזיה ב-1.1–1.8 ק"מ במרכז, ופחות ופחות עד כ-0.2 ק"מ בשפה, וזאת בכל רוחב שוליים. המדע: מסביר. המודל: מתאים — כיפה שקרסה, עם דחיסה חזקה ביותר במרכז; עמוד של 9–15 ק"מ שאיבד 12% מן החללים שלו שוקע ב-1.1–1.8 ק"מ, והקרקע הנמוכה ביותר נמצאת מעל המסה הצפופה.

B3 — קרום דק. בכל ארבעת מודלי הקרום של GRAIL, הקרום במרכז הוא 15–28 ק"מ מול 41–51 ק"מ בחוץ: האגן איבד כמחצית מן הקרום שלו או יותר. הקרום הדק ביותר (כ-61° דרום, 184° מזרח), הקרקעית הנמוכה ביותר שבין המכתשים (61° דרום, 199° מזרח) והמסה הצפופה (62° דרום, 200° מזרח) נמצאים בטווח של כ-230 ק"מ זה מזה, בדרום (גרסה מוקדמת נתנה כ-200 ק"מ). המדע: מסביר (פגיעה שנעה דרומה; Apollo — במכה משלו). המודל: מתאים — הקרום גלש מן הכיפה המחוממת, נדחף החוצה בידי החומר החם המתפשט

והותך מלמטה, עם כיפות קטנות של קרום דק מעל שתי היציאות, Apollo-ו Ingenii. מדוע רשומת המכתשים החלשה ביותר נמצאת בצד הצפוני של האזור הדק, כ-450 ק"מ מן הנקודה הדקה ביותר שלו, נשאר פתוח.

B4 — הטבעת החיצונית (מחקר 3). לאחר הסרת המגמה האזורית של הצד הרחוק, הקרום סביב SPA מעובה בכל ארבעת המודלים ב-3.8–5.7 ק"מ, ב-50°–55° מן המרכז, כ-320–470 ק"מ מעבר לשפה (גרסה מוקדמת נתנה 350–430 ק"מ), ברוחב של כ-450 ק"מ. הטבעת עומדת מעל הקרום שמעבר לה בשבעה משמונה כיוונים, עבה במזרח (7.8 ק"מ לכיוון 97°) וחסרה במערב, והיא מכילה כ-37% מן הקרום החסר באגן. המדע: מסביר בחלקו — אסימטריה לאורך ציר מזרח-מערב אינה נחזית בשום כיוון פגיעה. המודל: מתאים — החומר שגלש מן הכיפה נערם בשוליים, צר וקרוב במקום שבו פגש את הקרום העבה של הצד הרחוק בצפון-מזרח, ורחב במערב ובדרום-מערב.

B5 — הטבעת הפנימית (מחקר 4). טבעת שנייה של קרום מעובה, שנמצאה ב-22 מתוך 24 כיוונים, מרוכזת ב-51.4° דרום, 196.8° מזרח, כ-118 ק"מ מזרח-צפון-מזרחית למרכז האליפסה; הדופן הפנימית שלה תלולה ביותר בצפון-מזרח (30.7 מ"ק/מ) ומתונה ביותר בדרום-מערב (11.5 מ"ק/מ). המדע: מסביר בחלקו. המודל: מתאים — הטבעת היא שפת הכיפה, ומרכזה הוא מרכז הכיפה, היום במרחק 29° מיציאת Imbrium ו-24° מיציאת Serenitatis; שתי הטבעות עוקבות אחר עובי הקרום שמסביבן, ונערמות בתלילות מול הקרום המוצק של הצפון-מזרח, כמו שלג שנערם מול שפת מדרכה.

B6 — צפיפות ונקבוביות (מחקר 5). על פני השטח SPA נקבובי כמו הרמות (19.7% מול 20.3%); בעומק 10 ק"מ הנקבוביות שלו כמעט סגורות, 2.9%–4.4% במרכז מול 6.2%–7.9% ברמות של הצד הרחוק ו-9.6%–12.8% בשאר הצד הרחוק, ועולות בהתמדה לעבר השפה בשני מודלי העומק; הגרגרים צפופים יותר במרכז (3,005 מול 2,897–2,920 ק"ג/מ"ק). המדע: מסביר בחלקו — ההרכב נותן את הצפיפות, אבל לא דחיסה בעומק שנחלשת מן המרכז כלפי חוץ, שכן משקל השכבות שמעל סוגר נקבוביות באותה מידה בכל מקום. המודל: מתאים — חום שנשמר זמן רב מתחת למרכז צלה ודחס את השכבות הנקבוביות של החומר החוזר, והפרש הנקבוביות על פני 0–20 ק"מ מסביר 0.5–1.2 ק"מ מן השקיעה של B2.

B7 — קרקעית חריגה. מפות קרני הגמא של Lunar Prospector מראות ברזל שיוורד בהתמדה מן המרכז (9.5, 8.6, 6.6, 4.9, 4.4%), תוריום נמוך במרכז (1.7 חלקים למיליון) עם מקסימום ב-10°–20° ונקודות חמות של 4–5 חלקים למיליון בסהר לכיוון צפון-מערב, ויחס אשלגן לתוריום של 451–455 על פני כל הפנים, 16%–20% מתחת לאזורי ההשוואה. המדע: מסביר, כל ממצא בסיבה משלו. המודל: מתאים — אגם התכה מעל הברנר, מדרום לשתי היציאות; חומר כבד שהועלה עם החום; תוריום שנישא עם ההתכה לעבר הצד הנגרר; ואובדן חומרים נדיפים על פני כל האזור המחומם.

B8 — מעט לבה נראית. רק 4.1% מ-SPA הם ים, מול 30% מן הצד הקרוב (גרסה מוקדמת נתנה 32%); הכיסוי הוא 14.6% ב-300 הק"מ הפנימיים ו-0.7%–1.3% בשוליים, וכיפה מרכזית בגודל של אגן בצד הקרוב מכילה 8.4%, פחות מכל אחד משמונת האגנים בצד הקרוב שיש להם קרום דומה, בלי אגני השוליים (22%–74%, ממוצע 51%; גרסה מוקדמת נתנה ממוצע של 42%, שכלל את שני אגני השוליים). המדע: מסביר בחלקו. המודל: מתאים — האגן חומם והותך מלמטה ולא הוצף; רק במרכז החם הגיעה ההתכה אל פני השטח, והשטח המחומם העצום מדלל את האחוז, וזה מסביר את רוב הפער.

B9 — בזלות קבורות והים המרכזי. הלבה הקבורה של Wang ועמיתיו (2024) נמצאת כמעט כולה בתוך מעגל של 15° סביב מרכז הכיפה (13.6%–24.1% ממנו), יחד עם רוב הלבה הנראית, והתוריום יוצר סהר חד-צדדי ב-12°–32°, שכבה שנחלשת עם המרחק. המדע: מסביר. המודל: מתאים — הכיפה החזיקה תחילה ים גדול ורגיל, שנסגר ונקבר מאוחר יותר; היציאות של הברנר נמצאות ב-37.6° דרום, 160.0° מזרח וב-27.3° דרום, 198.4° מזרח, הנקודות האנטיפודיות של מרכזי Imbrium (37.6° צפון, 340.0° מזרח) ו-Serenitatis (27.3° צפון, 18.4° מזרח) — ספירות המכתשים משתמשות בנקודות האנטיפודיות של נקודות הפתח, 37° דרום, 161.5°

מזרח ו-25.4° דרום, 198.8° מזרח — והנזל שזרם החוצה הוטה בידי הסיבוב לעבר הצד הנגרר, כפי שסימולציה ביום של 5.77 שעות משחזרת, ורק כל עוד הגוף מסתובב מהר.

B10 — המסה הצפופה. הכבידה של GRAIL מראה עודף צפיפות מפוזר של 2.18×10^{18} ק"ג לפחות במעטפת מתחת ל-SPA, עמוק מ-300 ק"מ בגבול המועדף (James ועמיתיו, 2019), במחצית הדרומית של האגן. המדע: מסביר בחלקו — חומר צפוף שמוחזק במעטפת קשיחה, אבל מקורו נשען על גוף פוגע בעל ליבה, ומיקומו הדרומי אינו נגזר. המודל: מתאים — ברזל מכדור הארץ שהביא הברנר, שנדחף למעלה מעל אזור הים (רדיוס של כ-12.4° מול 15°), שקע כל עוד המעטפת הייתה חמה וקפא במקומו כשהתקשתה, נוטה לעבר הדרום החם והרך.

B11 — מעטפת שאיבדה את החומרים הנדיפים שלה. הדגימות של Chang'e-6, כ-11.6° ממרכז הכיפה, נושאות אשלגן וברזל כבדים איזוטופית (^{56}Fe 0.13%–0.21%), ויחס האשלגן לתוריום נמוך ואחיד על פני כל האזור המחומם, מול 563 ברמות ו-537 בשאר הצד הרחוק. המדע: מסביר בחלקו — הבזק פגיעה קצר נותן אשלגן כבד, אבל לא גירעון אחיד על פני 2,400 ק"מ, וגם לא ברזל כבד. המודל: מתאים — חימום חזק, מרוכז וממושך, להבה נמוכה מתחת לסיר ולא מבער שעבר פעם אחת, גירש יסודות נדיפים במידה בינונית ואף חלק מן האטומים הקלים של הברזל.

B12 — מעטפת דלה בחמצן. שתי שיטות בלתי תלויות על 23 שברי בזלת של Chang'e-6 נותנות $\Delta\text{IW} = -1.93$ מתחת ל-SPA, מול -0.80 מתחת לצד הקרוב — פי שלושה-עשר פחות חמצן זמין: המעטפת המחוזרת ביותר הידועה. המדע: מסביר בחלקו — שני מנגנונים אפשריים, וטרם הופרדו. המודל: מתאים — חום ממושך גירש את החומרים נושאי החמצן, והברזל המתכתי מכדור הארץ צרך את השאר, כמו צמר פלדה שמחליד במים, והברזל שקע יחד איתו (B10).

B13 — מקור מדולדל. ב-Chang'e-6 אותו אזור נתן בזלת עשירה ב-KREEP בגיל 4.2 מיליארד שנה ($\mu \approx 1620$), ומקור מדולדל במיוחד בגיל 2.8 מיליארד שנה ($\mu \approx 360$). המדע: מסביר. המודל: מתאים — החומר הגיע מכדור הארץ עשיר ביסודות הבורחים, ונשטף בהתכות חוזרות מלמטה, כמו שקית תה שמשתמשים בה שוב ושוב; היסודות שעזבו נמצאים בסהר התוריום, והשארת העמידה לחום מסבירה את מיעוט הल्בה המאוחרת של B8.

B14 — מתכת בנוריטים העתיקים. שני שברי נוריט בני כ-4.25 מיליארד שנה נושאים מתכת ברזל-ניקל עם יחס Ni/Co של 11–8.5, מעל המתכת של בזלות הירח (מתחת ל-5) ומתחת למעטפת של כדור הארץ (18.7), לליבה של כדור הארץ (כ-20) ולמטאוריטים פרימיטיביים (21.0). המדע: מסביר, כחומר של הגוף הפוגע. המודל: מתאים בחלקו — כל המתכות בירח הן ממקור ארצי, וגם זו; היחס שלה הונמך בהתכה חוזרת בסביבה מחוזרת ובערבוב של בערך חצי בחצי עם מתכת בעלת יחס נמוך שגם היא ארצית (מה שנותן כ-10–12); היחס אינו יכול להכריע בין מקור ארצי למקור זר, האיזוטופים של Cr, Ti, Mo, Ru ו-Os יכולים, וזהו המבחן החד ביותר של המאמר.

B15 — געשיות ממושכת. הרשומה המתוארכת נמשכת מן הנוריטים (4.25 מיליארד שנה) והבזלת העשירה (4.20 מיליארד שנה), דרך איפוס לפני 3.873 ± 0.008 מיליארד שנה, ועד שכבות מאוחרות דקות של 3.7–2.2 מיליארד שנה, כשהלבה הנראית מגיעה לשיאה לפני 3.6–3.2 מיליארד שנה. המדע: מסביר בקושי, באמצעות שתי פגיעות בנקודה אחת ושני מקורות במעטפת. המודל: מתאים — רצף אחד: הברנר בזמן החיבור, שהוזן בחום של כדור הארץ; הניתוק לפני 3.873 מיליארד שנה, שסגר את שלב החיבור; ואחריו החום של הירח עצמו, יחד עם הקרינה ההולכת ונחלשת של כדור הארץ המתרחק, שהתקרר לאט בנפחים הולכים וקטנים. הלבה הקבורה של המעגל המרכזי צפויה להיות בת 3.6–3.87 מיליארד שנה.

B16 — המגנטיות של SPA. במודל השדה T2015_449 בגובה 25 ק"מ, המרכז כמעט חשוף (0.8% מן השטח מעל 5 ננו-טסלה בטווח 10°, 2.0% ב-10°–20°), הטבעת מכילה 14%, הצפון, המערב והצפון-מערב 32%–42%,

והמזרח והדרום כלום; במינימום השדה הוא 1.9 ננו-טסלה (0.85 ננו-טסלה בנקודת בדיקה כ-20 ק"מ ממנו, הערך שגרסה מוקדמת נתנה למינימום עצמו). המדע: מסביר בחלקו — המרכז החלש והשפה החזקה מקבלים כל אחד הסבר, אבל הצד, והחפיפה שלו עם התוריום, נשענים על הנחות שנבחרו. המודל: מתאים — החום מחק את המגנט של המרכז, והרבה מן הברזל שלו שקע אל מחוץ להישג, ואילו ברזל שנישא עם הנזול לצד הנגרר שקע שם; המגנטיות והתוריום חולקים את הצד, לא את המקום (שיאי המגנטיות נמצאים כ-8° צפונית למרכז התוריום). מי מגנט את הברזל — עבודה עתידית.

B17 — המערבולות הבהירות. המערבולות הבהירות (swirls), חסרות התבליט, יושבות על אנומליות מגנטיות. ל-Mare Ingenii, בתוך הסהר, ליד הנקודה האנטיפודית של Imbrium, יש שדה ממוצע של 5.9 ננו-טסלה, ו-48% משטחו מעל 5 ננו-טסלה, ואילו ל-Mare Moscovienne, ים בצד הרחוק עם זרימות, יש 1.3 ננו-טסלה ואפס שטח כזה. המדע: מסביר בחלקו — ההבהרה מוסברת, המקור והמקום של הברזל אינם. המודל: מתאים — מערבולות נוצרות במקום שבו זרימה קפאה מעל ברזל מתכתי מעומק כדור הארץ, בסהר, ולא במקום שבו הייתה זרימה בלי הברזל הזה.

B18 — האנומליות יחד. מתוך שבע-עשרה האנומליות, המדע מסביר שש במלואן, תשע חלקית, אחת בקושי, ואחת — רשומת המכתשים — כלל לא; המודל מתאים לשש-עשרה ולאחת חלקית (B14), שהאיזוטופים יכריעו בה). ההבדל הוא באופן שבו התשובות בנויות: המדע נותן לכל אנומליה סיבה משלה, ואילו במודל כולן מסודרות סביב מרכז אחד ארוך ימים, ובשכבות לפי עומק: היציאות עם הכיפות הקטנות שלהן (12–16 Ingenii ק"מ, 5–9 Apollo ק"מ של קרום) בצפון, הכיפה והמרכז החם מדרום להן, והסהר של התוריום, המגנטיות והמערבולות בצד הנגרר — כמו שלהבה שנשמרת מתחת לסיר משאירה דפוס סביב הנקודה החמה ביותר, ובחישה חזקה אחת לא הייתה משאירה.

חלק C — הנקודות האנטיפודיות: מצורה פחוסה לכדור. הנקודות שממול Imbrium (37° דרום, 161.5° מזרח) ו-Serenitatis (25.4° דרום, 198.8° מזרח) נופלות שתיהן בחלק הצפוני של SPA, 1,022 ק"מ זו מזו, ונקודת האמצע שלהן כ-650 ק"מ ממרכז האגן (גרסה מוקדמת נתנה כ-700 ק"מ). העתק קשיח של אגני הצד הקרוב, מודפס סביב הנקודות האנטיפודיות שלהם, נותן מעטפות של 1340×2144 ק"מ (יחס צירים 1.60) מן הטבעות ושל 1185×2034 ק"מ (1.72) מ-19 פוליגוני הימות, מול 2056×2402 ק"מ (1.17) של SPA, עם כיוונים שאינם מתאימים. התוצאה השלילית נשמרת, משום שהברנר קובע היכן נמחקו מכתשים, לא את קו המתאר של האגן, שהוא שייך לכיפה ולקריסתה. כשמעמידים אותם על מפה אחת, המרכזים של חלק B נופלים בשלוש קבוצות לאורך קו צפון-דרום אחד: שתי היציאות עם הכיפות הקטנות שלהן בצפון; מרכז הכיפה, מרכז האגן, השיא המגנטי הקרוב ביותר למינימום ומינימום המכתשים, בטווח 6° ממרכז הכיפה (בטווח 9° זה מזה; גרסה מוקדמת אמרה בטווח 6° זה מזה), באמצע; והקרקע הנמוכה ביותר, המסה הצפופה והקרום הדק ביותר, בטווח של כ-230 ק"מ, בדרום. הקו ממרכז כדור הארץ דרך מרכז המגע (24.1° צפון, 335.2° מזרח) יוצא מן הצד הרחוק ב-24.1° דרום, 155.2° מזרח, 41.8° מן הכיפה. אולם בתוך האגס המסתובב הדחיפה ניצבת לציר הסיבוב של כדור הארץ, ולכן החום נכנס לדיסקת המגע מצפון למרכזה, במקום שבו נמצאים שני הברנרים, ויצא מן הצד הרחוק עד כ-22.5° מדרום לנקודה שממול: האגס עמד ב-10°–25° צפון, והדחיפה החוצה של הסיבוב אופקית בכל גובה, כמו על קרוסלה. היציאות והכיפה נפרשו על הגוף המוארך (0.601:0.637:1); כשהוא נעשה כדור, המרחקים מקצה הציר הארוך שלו נפתחו בלי שדבר נע על פני השטח: הקואורדינטות של יציאת Imbrium השתנו ב-5.5°, של יציאת Serenitatis ב-11.8°, של מרכז הכיפה ב-13.0° ושל המינימום ב-12.6°, והמרחק של הכיפה מן היציאות גדל מ-17° ו-21° ל-24° ו-29° של היום. הסיבוב הכריע שהכיפה נמצאת בדרום; המעבר מן הצורה הפחוסה לכדור הכריע כמה רחוק. שינוי בציר של כדור הארץ לאחר הניתוק עשוי לגרום ל-SPA להיראות שלא בקו אחד עם הברנר; הצירים נשארים לעבודה עתידית.

חלק D — הגרסה הדינמית: עמוד, סיבוב וזווית. חלק D שואל אם המספרים מאפשרים לחומר ולחום לחצות מפנים כדור הארץ אל הצד הרחוק. שימור התנע הזוויתי נותן מהירויות רדיאליות של 1.8–2.6 ק"מ/ש' וזמני מעבר

של 1.2–1.5 שעות, חלק מסיבוב אחד; האנרגיה הקינטית, 1.6–3.4 מגה-ג'אול/ק"ג, הופכת באופן אידאלי ל-5–10 ג'יגה-פסקל בצפיפות 3,000 ק"ג/מ"ק. הפוטנציאל האפקטיבי $\Phi_{\text{eff}} = -GM_0/r - \frac{1}{2}\Omega^2 r^2$ עולה מפני השטח לראש גבעה ברדיוס הקורוטציה. מן הרדיוס המקומי של כדור הארץ הפחוס בקו הרוחב של המקור, 25° צפון (6,602 ק"מ), ועד 16,399 ק"מ ביום של 5.77 שעות, המחסום הוא 26.2 מגה-ג'אול/ק"ג, וחבילת חומר שעולה לבדה חסרה לו פי שבעה עד שישה-עשר. אבל החומר של המודל אינו חבילה בודדת אלא גוף רציף בלחץ חיובי: החלק שמעבר לרדיוס הקורוטציה מוריד את הלחץ שמתחתיו, וחומר מלמטה נדחף למעלה כמו בסיפון, בעוד המנוע נשאר לחץ המקור של כ-150 ג'יגה-פסקל של מאמר 3. ההקלה פועלת רק בשלבים המאוחרים, והמחסום האפקטיבי ולחץ הבסיס המופחת עבור גוף בצורה של מאמר 3 הם דרישה. בצד הרחוק הסיבוב מסייע לחומר לצאת מן הפתחים, ומקלף רסס מאוחר של שברים קטנים שחוזרים כמכתשים קטנים וטריים על הגדולים; חומר שיוצא מתחת למהירות הבריחה של כ-2.3 ק"מ/ש' ברדיוס של אז, 1,890 ק"מ, ועולה פחות מכ-700 ק"מ נשאר בתוך ספירת Hill של הירח (כ-2,600 ק"מ ממרכזו, במרחק 16,400 ק"מ, 1.4 רדיוסים של הירח של אז) ונחת עליו בחזרה (גרסה מוקדמת, עם הרדיוס של היום, נתנה 2.4 ק"מ/ש' ו-900 ק"מ). הסטת קורוליס אינה יכולה למקם את שתי היציאות ביחס לאגן (הנקודה האנטיפודית של Serenitatis נמצאת 7.8° מן המרכז בכיוון ההסטה הזאת, וזו של Imbrium בצד השני), ולכן הגאומטריה באה מן הדחיפה האופקית של חלק C; זווית יציאה קטנה של 1° – 3° , שנשמרת לאורך מסלול של 9,447–11,199 ק"מ, ממקמת את החום 165–590 ק"מ מן הנקודה שממול בדיוק.

חלק E — אתגרים ותשובות. שבעה ממצאים שפורסמו ושנראים כעומדים נגד ההצעה נענים מתוך החומר של המאמר עצמו. אירידיום וזהב בגרגרי מתכת של Chang'e-6 (Liu ועמיתיו, 2026) נמצאים בשברי רגולית לא מתוארכים, שבהם מותר אבק חלל דק שנמשך מאוחר יותר אל שכבת פני השטח, ויחסי יסודות אינם מבחינים בין אסטרואיד לבין הפנים העשיר במתכת של כדור הארץ. יחס Ni/Co של 8.5–11 בנוריטים (Su ועמיתיו, 2025) ממקם את המתכת מעל המתכת של בזלות הירח, אבל גם המעטפת של כדור הארץ (18.7) וגם כונדריטים מסוג CI (21.0) נמצאים מעליו, והיחס של גרגר משתנה בכל פעם שהוא מותך מחדש, ולכן היחס אינו יכול להבחין בין שני המקורות; האיזוטופים מכריעים. המסה הצפופה נמצאת כ-500 ק"מ מדרום למינימום, משום שהמינימום מסמן היכן החום מחק מכתשים על פני השטח, והמסה — היכן חומר כבד שקע. השיא המגנטי החזק הקרוב ביותר נמצא כ-230 ק"מ מן המינימום, שבו השדה חלש (1.9 ננו-טסלה), כפי שדורש חום שמוחק מגנוט בליבתו ומשאיר אותו בשוליים הקרים יותר. הקרום במינימום (19–28 ק"מ) אינו הדק ביותר (15–24 ק"מ במרכז הנומינלי), משום שהטענה היא שהגירעון נמצא בתוך אזור הקרום הדק, ומקומו נקבע בידי כיוון היציאות. הבזלות הקבורות של Wang ועמיתיו (2024), לפחות 8.7×10^4 קמ"ר, הן תוצר של הברנר, לא מתחרה שלו; המבחן הוא אם הרדיוס של המכתשים נמשכת גם מחוץ להן. והכלל "חוץ מברגולית" נוגע למקור של דגימה, לא למקום שבו נאספה: חומר זר בדגימה עתיקה, אם ימצא בכלל, צפוי רק בכמויות זעירות.

חלק F — חיזויים ומבחנים. החד ביותר הוא שבדגימות העתיקות של הירח אין חומר ממקור לא ארצי: המתכת בשני הנורטים המתוארכים חייבת לשאת חתימה ארצית ב-Cr, Ti, Mo, Ru או Os. אם ימצא חומר זר בכלל, הוא צפוי בכמויות זעירות — אבק חלל, או מטאוריט אחד או שניים שנחתו במשך ארבעה מיליארד שנה. עוד: אובדן חומרים נדיפים וחיזור חזקים ביותר ליד המינימום וחלשים יותר לעבר השפה; מכתשים רדודים שנמשכים גם מחוץ לבזלות הקבורות; מכתשים בעלי קרקעית סדוקה שמרוכזים בגירעון; מגנוט שחזק ביותר בשולי הליבה המחוממת ומקורו בעומק; גירעון שעוקב אחר הנקודות האנטיפודיות של פתחי הצד הקרוב; ים מוקדם גדול, שנסגר ונקבר, עם חתימת כבידה של המיליון שלו; רסס מאוחר של שברים קטנים, כשהמכתשים הקטנים על מארחים גדולים טריים בעוד המארחים שלהם שחוקים (מדגם מוקפא של 20 מארחים בתוך SPA ו-20 בביקורת, 2,634 מכתשים קטנים מועמדים, ממתין לבדיקה); שתי אוכלוסיות מכתשים בגילים שונים; ומכתשים צעירים בעלי שפות גבוהות יותר בתוך SPA מאשר מחוצה לו. שני חיזויים כבר נמדדו במאמר: טבעות הקרום שגלש החוצה אוששו, והדחיסה בעומק נתמכת. המבחנים שדורשים נתונים חדשים מפורטים: המינימום המרחבי של העומק לאחר מסכת הימות; ספירה של מכתשים בעלי קרקעית סדוקה; תוריום, תחמוצת ברזל והידרוקסיל

שנדגמים לאורך פרופיל המכתשים; העומק והכיוון של המגנט; מבחן אפס לבחירת Serenitatis מבין כל הפתחים; ומבחן מחוץ למדגם.

חלק G — מסקנות ועבודה נוספת. חמשת המחקרים נוסחו כל אחד עם סף שנקבע מראש לפני המדידה, וכל החמישה יצאו ירוקים: רשומת המכתשים (0.51 במרכז, המינימום על קו האורך של Serenitatis, הגדלים הבינוניים חסרים, מכתשים רדודים עם שפות גבוהות; מגבלה: ספירות קטנות במרכז); עודף העומק של 1.1–1.8 ק"מ (מגבלה: המסה הצפופה יכולה למלא חלק ממנו); הטבעת החיצונית בשבעה משמונה כיוונים (מגבלה: היא מכילה כ-37% מן הקרום החסר); הטבעת הפנימית ב-22 מתוך 24 כיוונים; וסגירת הנקבוביות בעומק (מגבלה: אקסטרפולציה מהיפוכים שפורסמו). המסקנות באות בסדר הטיעון: המרכז דל במכתשים ומכיל מכתשים רדודים, והגירעון נוטה לעבר הנקודה שממול Serenitatis; זה נקרא כמקור חום מתחת לצד הרחוק, שהוזן דרך Serenitatis-I Imbrium בשלב החיבור — לפחות כ- 10^7 שנים, ובמודל כ-600 מיליון שנה מתחילת הבליטה ועד השחרור לפני 3.873 מיליארד שנה — וכהזנה מכדור הארץ הסתיים בשחרור, ואחריו פעלו החום של הירח עצמו והקרנה ההולכת ונחלשת של כדור הארץ המתרחק, והכול התקרר לאט; העומק, הטבעות, הנקבוביות הסגורות, הכימיה של Chang'e-6, המעטפת המחוזרת, הגעשיות הארוכה והמגנטיות מתאימים לאותה קריאה; מראה קשיחה של הצד הקרוב אינה יוצרת את צורת האגן, והתוצאה הזאת נשמרת; המרכזים נמצאים על קו צפון-דרום אחד, בשלוש קבוצות; הכיוון הדרומי נקבע בידי האגס והסיבוב, והוגדל בידי ההתעגלות; ציר כדור הארץ נשאר לעבודה עתידית; והחיזוי החד ביותר ניתן להכרעה בידי האיזוטופים. עבודה נוספת: מודל פיזיקלי של מסלול החום ומאזן האנרגיה שלו; מאזן חמצון-חיזור לחיזור; המבחנים הדינמיים מחושבים מחדש בקבועי הסדרה, שייתנו את המחסום האפקטיבי ואת לחץ הבסיס של חלק D; המבחנים של חלק F; וכעבודה עתידית מחוץ למאמרי הסדרה, הצירים של הירח ושל כדור הארץ בזמן ההתעגלות.

c.9 מאמר 9 — הפסים (The Stripes)

הטענה

הפסים הארוכים והישרים על קרקעית צפון האוקיינוס השקט הם הצד המוביל של האגס שעליו נבנה הירח: הם נמתחו בכיוון הסיבוב של כדור הארץ כל עוד האגס עמד, ונקפלו לפסים כשהוא נאסף בחזרה אל כדור הארץ. קצה האגס — המקום שבו נוצר הירח — נמצא מערבית לבסיס, בצד הנגרר, והשאיר את קווי המתאר שלו בשני כיפופים של הפסים, בחותם ראי של הצד הקרוב, ובשתי שרשראות רכסים שנמשכו כלפי מעלה כשהקצה הורם והתרחק.

חלק A — מבוא: הפסים. שישה פסים — Clipperton-I, Clarion, Molokai, Murray, Pioneer, Mendocino — חוצים את קרקעית צפון האוקיינוס השקט לאורך אלפי קילומטרים; Clipperton לבדו נמשך כ-7,240 ק"מ, יותר מרדיוס כדור הארץ. רואים אותם הכי טוב במפות של גרדיאנט הכבידה האנכי, המראות היכן משיכת הכבידה משתנה בחדות על פני מרחק קצר, ולכן מבליטות קפלים ושקעים צרים, בין שהם על פני השטח ובין שהם קבורים מתחת לחומר צעיר יותר. כל השישה הם מקבילים של קו משווה אחד: כל אחד שומר מרחק קבוע ממעגל גדול נטוי אחד, כפי שקווי הרוחב שומרים מרחק קבוע מקו המשווה של היום. קווים מן הסוג הזה הם מה שתנועת סיבוב אחת סביב ציר אחד משאירה אחריה, ושישה מהם החולקים קו משווה אחד, מ- 33.6° צפונה ממנו (Mendocino) עד 1.8° (Clipperton), הם אילוף חזק על הדרך שבה נוצרו. חלק A מזכיר אחר כך את האגס של מאמר 3 (LEF Mechanism in Practice): בליטה אחת של כדור הארץ הצעיר, רחבה בבסיסה ליד Kiritimati (1.9° צפון, 157.5° מערב), הולכת ומצטמצמת עד הקצה שעליו ישב הירח, ונוטה לאחור כנגד הסיבוב, כפי שילד ההולך החוצה על קרוסלה מסתובבת נדחף לאחור. החזית שלו, הפונה אל הסיבוב — הצד המוביל, במזרח — נמתחה; הגב שלו, הצד הנגרר, היה מתחת לקצה הנוטה. שחרור הירח לא גרם לאגס לקרוס: ההתמיינות,

הפועלת על האגס בין שיש עליו ירח ובין שאין, אספה אותו בחזרה אל כדור הארץ במשך עשרות עד מאות מיליוני שנים אחרי השחרור. המסה לא עזבה את כדור הארץ; היא עברה ממקום גבוה בחוץ למקום עמוק בפנים, והקיר המוביל הונח לאורך הקרקעית ונקפל על עצמו לפסים.

חלק B — התצפיות. שמונה תצפיות; כל אחת מוצגת קודם כמה שהמפה מראה ואחר כך כמה שהמודל מצפה לו. הפסים יוצרים חגורה אחת סביב קו משווה אחד (B.1), עם שני פסים נוספים כ-6° וכ-14° דרומה ממנו (B.4), כך שהבסיס נמצא בתוך המערכת ולא בשוליה. בסיס האגס, שמוקם במאמר 3 על פי המעטפת העמוקה לפני שהפסים נשקלו כלל, נמצא 1.6° מאותו קו משווה, לצד Clipperton שב-1.8° (B.2): זהו ממצא ולא בחירה, משום שגוף העולה מכוכב לכת מסתובב עולה במקום שבו המשיכה החוצה של הסיבוב גדולה ביותר, על קו המשווה של זמנו. הפסים נמשכים מן הבסיס מזרחה עד אמריקה, ואינם ממשיכים כמקבילים ישרים מערבה ממנו (B.3). בארבעה מפגשים — ליד 36° צפון 178° מערב, באי Line ליד 6° צפון 159° מערב, ליד איי Phoenix ב-2° דרום 175° מערב, וליד 13° דרום 152° מערב — הפסים עוברים מתחת לרכסים הגעשיים, והרכסים עומדים שלמים (B.5): חריץ שנחתך מלמעלה היה חותך את הרכס, כמו סכין הנמשכת על פני מפת שולחן ופוגשת את הספר המונח עליה, ואילו קפל שנוצר מן הצדדים ומלמטה עובר מתחתיו, כמו מפה שמתקמטת ומרימה את הספר בשלמותו. מערבית לרכסים הפסים החיצוניים עוזבים את המקבילים שלהם ופונים זה אל זה — כ-14° וכ-8° במבטים אלכסוניים עם הגזמה אנכית של 30 ושל 200; זוהי קריאה ראשונה, שיש למדוד על מפה שטוחה (B.6). מתחת לבסיס, החלק התחתון ביותר של המעטפת איטי בכל חמשת המודלים של מפות ההצבעה הסייסמיות, ומרכז האזור האיטי של האוקיינוס השקט נמצא 1,480–1,660 ק"מ דרום-דרום-מערבית לו (B.7). מערבית לקצה, הקרקעית ושוליה מקומטים לכל הכיוונים — הקשתות של הפיליפינים ושל מריאנה, הקשתות של אינדונזיה, קשת Banda המכופפת כאנקול — במרחק 8,100 עד 10,300 ק"מ מן הבסיס, כאורך אגס אחד (B.8): זהו הגב של האגס, שלא הייתה לו משיכה אחת משלו ונאסף בחזרה בלי סדר, כמו שטיח שנדחק לערימה ומתקמט במקום לשכב שטוח.

חלק C — קצה האגס: המקום שבו נוצר הירח. מערבית לבסיס, הפס הצפוני מתכופף כלפי מטה ב-23.8° צפון 164.9° מזרח, והפס הדרומי מתכופף כלפי מעלה ב-5.3° דרום 173.2° מזרח. בין שני הכיפופים 3,360 ק"מ (3,040–3,700 ק"מ כשמזיזים כל סימון ב-15 פיקסלים), בין המגע ברוחב 3,000 ק"מ שעליו ישב הירח בשחרור לבין הכיפה ברוחב 3,650 ק"מ שמעליו; המרכז שלהם, 9.3° צפון 169.3° מזרח, נמצא כ-3,760 ק"מ מערבית לבסיס (3,762 ק"מ לפי הקואורדינטות; גרסה מוקדמת נתנה 3,770 ק"מ), בצד הנגרר — במקום שבו אגס שנטה לאחור היה מוריד את הקצה שלו. הבסיס והשפה הדרומית של הקצה שוכנים על קו המשווה של הפסים; מרכז הקצה שוכן כ-15° צפונית לו (14.4°–16.4° לנטיית של 10°–14°). זה אינו קו הרוחב של השחרור, 22.5°, שהוא הכיוון של מרכז הירח ממרכז כדור הארץ: אלה שני גדלים שונים במערכות ייחוס שונות, והקשר ביניהם שייך לעבודה העתידית על הצירים (C.1–C.2). בתוך האזור הזה נמצא החותם של הצד הקרוב כתמונת ראי — שני פנים שנלחצו זה אל זה מחליפים מזרח ומערב ושומרים על הצפון, כפי שחותמת גומי מדפסה את ההפך של פניה — מוגדל פי $1.37 = (3344/1300)^{1/3}$, הגורם שבו התכווץ כל אורך על הירח מאז שצפיפותו עלתה מ-1,300 ק"ג/מ"ק על הקצה ל-3,344 ק"ג/מ"ק של היום (דרך שנייה, דרך השלבים של הסדרה, נותנת 1.31). כש-Imbrium נשאר בסימון של המחבר, 13.19° צפון 179.04° מזרח, הראי מציב את Serenitatis על שרשרת איי מרשל, 410 ק"מ ממרכז הקצה, ואת מרכז המגע 1,260 ק"מ ממנו, שניהם בתוך טביעת הרגל שרדיוסה כ-1,680 ק"מ; Nectaris, הרחוק דרומה גם על הירח, נופל מעט מחוץ לה, ב-1,970 ק"מ (C.3). קריאה ראשונה בעין סימנה את Imbrium, Serenitatis ו-Nectaris כתמונה ישרה; הדרישה ששני פנים במגע ישאירו תמונת ראי הראתה ששלושת הסימונים אינם יכולים להיות נכונים כולם, וכלל הראי, שהופעל מ-Imbrium בלבד, החליף אותה. לבסוף, מערכת הפסים, ממקום הקצה עד הקצה המזרחי של Clipperton ליד אמריקה, ארוכה 9,360 ק"מ, מול אגס שהגיע בשחרור לאורך 9,680–9,800 ק"מ מפני השטח של כדור הארץ עד קו הקורוטציה — המרחק שבו גוף שמסתובב עם כדור הארץ כבר נע במהירות של מסלול חופשי (16,399 ק"מ, ביום של 5.77

שעות): קיר שהונח שטוח מכסה בערך אותו שטח קרקעית שהוא היה גבוה, כמו עץ שנכרת, ושני האורכים מתאימים זה לזה בתוך 4% בלי שום פרמטר שכוון ביניהם (C.4).

רוחב אחד, נמדד בארבע דרכים	ק"מ
המגע שעליו ישב הירח בשחרור (מאמר 3)	3,000
רכסי השפכטל, מזוג איים לזוג איים (חלק D)	2,800–3,500
שני הכיפופים של הפסים (C.1)	3,360
הכיפה שמעל המגע (מאמר 3)	3,650
מן הקצה אל הבסיס (C.2)	3,760

כיצד לקרוא את הטבלה: השורות מסודרות לפי גודל, והגוון מעמיק יחד איתו. שתי שורות באות מן האגס של מאמר 3, שלוש מקרקעית האוקיינוס השקט; כל החמש נמצאות בתחום של כשלושה וחצי אלפים קילומטרים, הרוחב של המקום שבו ישב הירח.

חלק D — רכסי השפכטל. משני צדי חותם הראי עומדות שרשראות הרכסים הגדולות של מרכז האוקיינוס השקט: שרשראות Marshall–Gilbert–Tuvalu במערב, עם ההרים של מרכז האוקיינוס השקט (Mid-Pacific Mountains) ו-Wake רחוק יותר בצפון-מערב, ואי Line במזרח, עם Palmyra ו-Kiritimati. המאמר קורא אותם כרכסים שנמשכו כלפי מעלה מלמעלה בזמן הניתוק. התמונה היא של טייח המושך שפכטל שטוח ישר החוצה מטיח טרי: השכבה הרכה נדבקת לשני המשטחים, נמתחת כשהמרווח נפתח, ונשארת ברכסים לאורך שולי השפכטל. כאן השפכטל הוא הקצה שהירח עליו, הקיר הוא הקרקעית, והטיח הוא שכבה צמיגה ביניהם. המרחק בין השרשראות הוא 2,800–3,500 ק"מ (Majuro–Kiritimati 3,490 ק"מ, Tarawa–Palmyra 2,810 ק"מ, מאמצע לאמצע 3,290 ק"מ); השרשרת המערבית עוברת דרך מרכז הקצה — Kwajalein נמצא 180 ק"מ ממנו — והשרשרת המזרחית נושאת את הבסיס עצמו. רכס שנמשך כלפי מעלה ברגע אחד אינו אמור להראות את ההתקדמות הסדירה בגילים של מסלול פלומה — שורת הרי הגעש שעמוד קבוע של חומר חם משאיר כשהקרקעית נעה מעליו, כמו סימני חריכה מנר שמתחת לדף נייר הנמשך מעליו. אי Line התפרצו בשני אירועים, לפני 81–86 ולפני 68–73 מיליון שנה, כל אחד בבת אחת לאורך 1,200 עד יותר מ-4,000 ק"מ, והספרות קוראת אותם כמתיחה של הקליפה החיצונית ולא כמקור העולה מלמטה; אי מרשל משתרעים על פני 66–140 מיליון שנה בלי סדר פשוט; רק Hawaii–Emperor מראה התקדמות נקייה, מ-0 עד כ-81 מיליון שנה. השוואה לרכסים שנקראים כבנויים מלמטה מחוץ לאוקיינוס השקט — Ninetyeast (אורכו 5,000 ק"מ, 77 מיליון שנה בצפון עד 43 מיליון שנה בדרום), Walvis ו-Chagos–Laccadive — בגילים, בצורה, בתעלת הכיפוף (השקע שאליו מתכופפת הקליפה תחת עומס), בשורש הקרום (השדרית המעובה שמתחת לרכס) ובכיוון, מוגדרת למחקר 7.

חלק E — קו המשווה של אז. כל פס שנמדד עולה צפונה ככל שמתקדמים מזרחה: Mendocino $+2.4^\circ$, Murray $+12.7^\circ$, Clarion $+9.0^\circ$, Clipperton $+11.0^\circ$, הפס הדרומי $+11.7^\circ$ (E.1). קווים מן הסוג הזה הם מה שהמקבילים של קו משווה נטוי נראים כמותו על המפה של היום. כשמתאימים אותם יחד, הפסים הם מקבילים של קו משווה אחד הנטוי לזה של היום ב- 10° לפחות: קו הסמוך לקו משווה נטוי עולה לכל היותר בערך בזווית הנטייה, ולכן נטייה קטנה יותר אינה יכולה להפיק את Clipperton ואת הפס הדרומי; נטיות של עד כ- 20° מתאימות כמעט באותה מידה, משום שהנקודות משתרעות רק על פני כ- 55° של קו אורך (E.2). בנטייה של 10° – 14° הבסיס נמצא על קו המשווה של המערכת; ההתאמה הראשונה, 11° , חוצה את קו המשווה של היום ב- 159° מערב, 1.5° מן הבסיס. הפסים הונחו כשהאגס נאסף בחזרה, אחרי השחרור (E.3). עד אז עמדה מסה של תשע עד שתיים עשרה מסות ירח (מאמר 3, לפי רוחב הבסיס) גבוה מעל פני השטח בצד אחד של כדור הארץ; כשעברה ממקום גבוה בחוץ למקום עמוק בפנים, היא שינתה את פיזור המסה של כדור הארץ סביב צירו, כפי שגוש מרק שנלחץ לתוך כדור מסתובב גורם לכדור להתגלגל לאט לאיזון חדש. הפסים מתעדים אפוא את קו

המשווה בזמן שהאגס נאסף בחזרה, ואולי את תחילת אותה תפנית. כמה רחוק וכמה מהר הסתובב כדור הארץ — זה נשאר לעבודה עתידית על הצירים.

חלק F — אתגרים. שלוש התנגדויות זוכות למענה. ראשית, הקרקעית שבין הפסים מתוארכת לכל היותר לכ-180 מיליון שנה. במודל הקרקעית צוברת שכבות: שכבה חדשה מונחת מלמעלה בזמן שהשכבה שמתחתיה נלקחת בחזרה ומתחדשת מלמטה, כך שמה שמתוארך הוא השכבה האחרונה ולא הפסים — כפי שתיארוך של שלג טרי על שדה חרוש נותן את תאריך השלג, לא את תאריך התלמים שעדיין נראים דרכו. המפות מתיישבות עם זה: בטופוגרפיה הפסים חלשים, ובגרדיאנט הכבידה, הרואה ניגודי צפיפות מתחת לפני השטח, הם חדים, כפי ששרידים מתחת לחומר חדש היו נראים. הדרישה היא שבמקום שבו קידוחים או חתכים סייסמיים חוצים פס, הקפל ימשיך מתחת לשכבות הצעירות ביותר, והשכבות שמעליו יהיו דקות יותר מעל פסגותיו (מחקר 9). שנית, העובדה שהפסים עוברים מתחת לרכסים אינה קובעת כשלעצמה מה בא קודם; רכס שכבר עמד מעל קפל בהיווצרות אמור להתקצר במקום שבו הקפל עובר (מחקר 6). שלישית, לשרשרת Hawaii-Emperor יש התקדמות נקייה; אם היא רכס שפכטל, הלבנות המתוארכות חייבות לתעד רצף מאוחר יותר של התפרצויות על רכס שכבר עמד, Hawaii-1 נשאר המקרה הפתוח בין שלוש השרשראות.

חלק G — חיזויים, מבחנים והמחקרים הבאים. תשעה מחקרים, כל אחד עם התוצאה שהוא מצפה לה: (1) התאמה מחדש של קו המשווה על עקבות מלאים של הפסים — קו משווה משותף שעובר דרך הבסיס; (2) מבחן מקריות לבסיס בתוך $\pm 2^\circ$ מקו המשווה; (3) צד אחד בלבד — פסים שאינם ממשיכים מערבה מן הבסיס; (4) מדרגות בעומק ובגיל לרוחב כל פס, מסודרות סביב הבסיס; (5) האסימטריה מזרח-מערב של האוקיינוס השקט סביב הבסיס; (6) רציפות מתחת לרכסים על מפה שטוחה בלי הגזמה — פסים שאינם נקטעים בידי הרכסים, ורכסים שהופרעו במקום שבו קפל עבר מתחתם; (7) רכסי השפכטל מול שלושת הרכסים הבנויים מלמטה — ניתנים להבדלה ממסלולי פלומה; (8) מבנים מעגליים במקומות המשתקפים של Nectaris, Serenitatis, מרכז המגע ושאר הימות של הצד הקרוב, בקנה מידה 1.37; (9) הפסים מתחת לשכבות המתוארכות בחתכים סייסמיים ובקידוחים — ממשיכים מתחת לשכבה הצעירה ביותר, עם שכבות שעוביין משתנה לרוחב הקפל.

חלק H — מסקנות. ברמזור של המאמר חמש שורות ירוקות — הבסיס על קו המשווה של הפסים, רוחב הקצה, אורך הפסים, הצד הקרוב בתוך הקצה כתמונת ראי, הפסים מתחת לרכסים בארבעה מפגשים — וארבע שורות כתומות הממתינות למחקרים: הצד הנגרר, ההתכנסות מערבית לרכסים, רכסי השפכטל וגיל קרקעית הים. כשקוראים אותם כתמונה אחת: אגס מחומרו של כדור הארץ עצמו עמד על האוקיינוס השקט, בסיסו ליד Kiritimati וקצהו כ-3,760 ק"מ מערבה, והירח עליו; אחרי שהירח עזב, כשהאגס נאסף בחזרה, הקיר המוביל שלו הונח מזרחה לעבר אמריקה כ-9,360 ק"מ של פסים, הגב שלו התקמט לתוך הקשתות של מערב האוקיינוס השקט, הקצה משך כלפי מעלה את שרשראות הרכסים משני צדיו, ופני הירח השאירו את תמונת הראי שלהם על הקרקעית בקנה מידה 1.37. הפסים מתעדים את קו המשווה של אותו זמן, הנטוי ב- 10° לפחות ביחס לזה של היום.

C.10 מאמר 10 — מאדים (Mars)

הטענה

הירחים של מאדים עשויים ממאדים, ולא נאספו משברים. מאדים צעיר, שרדיוסו היה פי 1.5 מרדיוסו של היום ושהסתובב פעם אחת בחמש שעות, ירה שני פקקים מן הקרום שלו עצמו מתוך צינור געשי אחד ב-Pavonis Mons, בדחיפה של גז כלוא. טבעת שמאדים בנה קודם לכן מן האדים שלו עצמו נתנה לכל פקק את המהירות הצידיית שחסרה לו, עיגלה את מסלולו ומשכה אותו אל מישור המשווה; אותו חיכוך גם שחק אותו. אחר כך דחפה הגאות של מאדים הצעיר והרך את שני הירחים כלפי חוץ. Deimos, הראשון, ששהה

זמן רב בטבעת, עבר את קו הקורטציה הסופי ומתרחק, חלק; Phobos, השני, שנבלם, פגש רק את השוליים הדלילים של טבעת הולכת ודועכת, שמר על החריצים שלו, נלכד בידי הקו הנע, ומאז הוא נופל.

חלק ו – מה קרה. Deimos ו-Phobos קטנים (27 ו-15 ק"מ קוטר), כהים ונקבוביים, במסלולים כמעט מעגליים מעל קו המשווה, משני צדי רדיוס הקורטציה של מאדים, 20,428 ק"מ. Deimos חלק ומעוגל; Phobos חרוץ בחריצים ארוכים. לכידה אינה נותנת מסלולים מעגליים משוונים; דיסקת פגיעה, ההסבר המוביל, מערבת את מאדים עם הגוף הפוגע; בשני ההסברים תכונות פני השטח דורשות סיבות נפרדות. המאמר לוקח את הרעיון המשותף של הסדרה – גוף העשוי מפנים גוף האם, שמהירותו ניתנה לו בידי הסיבוב של גוף האם – ועוקב אחריו על מאדים בדרך אחרת. מאדים לא בנה אגס ולא כיפה סגורה. מאדים צעיר ברדיוס 5,084 ק"מ, שהסתובב בחמש שעות, נתן לכל מה שעזב את קו המשווה שלו מהירות צידית חופשית של 1.78 ק"מ/ש', והחזיק אותו למטה בכבידה של רבע בלבד מזו של היום, 1.04 מ'/ש²; קו הקורטציה שלו עמד ב-7,057 ק"מ, פחות מ-2,000 ק"מ מעל הקרקע. מתחת לקרום אטום החזיק כוכב הלכת מים וגז. פקק רך וחס אטם צינור געשי כמה קילומטרים מתחת לפתח, וגז כלוא בלחץ של 0.25–0.5 ג'יגה-פסקל דחף אותו לאורך דרך של 200–300 ק"מ מתא עמוק, כשדפנות הצינור מוחזקות בידי משקל החומר שסביבו. פיצוץ געשי חופשי מוגבל לכ-1 ק"מ/ש'; דחיפה כלואה מן הסוג הזה נותנת 2.4–2.9 ק"מ/ש'. צינור אחד ירה פעמיים: הפקק הראשון, Deimos, קטן, קל ורטוב, יצא בנקיות; השני, Phobos, גדול וקשה יותר, נגרר על הדפנות ונבלם.

ירייה	שיא, ק"מ	כלפי חוץ, ק"מ/ש'	צידית בשיא	מסלול שם
Phobos, נבלם, נמוך יותר	10,000	2.44	0.90	2.07
Phobos, נבלם	11,000	2.57	0.82	1.97
Deimos, אל הטבעת	15,000	2.89	0.60	1.69
Deimos, ישר אל מסלולו	23,463	3.19	0.38	1.35

קריאה מלמעלה למטה: ככל שהירייה גבוהה יותר, הגז חייב לתת יותר (מוצלל, כהה יותר עם המהירות), והמהירות הצידית בשיא (ק"מ/ש') רחוקה יותר ממהירות המסלול באותו גובה. כל פקק צריך רק להגיע אל הטבעת; הטבעת והגאות עושות את השאר.

פקק שנורה מפני השטח מגיע לגובה הטבעת אבל לא למסלול שלה: לבדו הוא נופל בחזרה בתוך הקפה אחת. המהירות החסרה באה מטבעת שמאדים בנה בשלביו הראשונים מן האדים של כל סדק. ליד פני השטח החמים האדים נשארו גז צלול; גבוה יותר הם קפאו לגבישי קרח ולאבק שהקיפו במהירות מסלול, ומעבר לכ-13,000 ק"מ, גבול רוש לקרח, הם התקבצו לגושים. גוף שחוצה את הטבעת נגרר קדימה לעבר המהירות שלה: הוא מקבל את מסלולו, מעוגל ומשווני, ואותו חיכוך שוחק אותו. הטבעת חייבת לתת לפחות כ-0.6 ממסת כל גוף בצימוד מושלם, ובפועל בסדר גודל של 10^{16} ק"ג; ההסבר עומד או נופל איתה. מעבר לקו, הגאות של מאדים הצעיר, הרך והמהיר, שפיזר פי 8 עד 20 יותר מהיום, דחפה כל ירח כלפי חוץ. Deimos נישא מכ-15,000 ל-23,463 ק"מ בחצי מיליארד עד מיליארד שנה, עבר את 20,428 ק"מ לפני שהקו הגיע לשם, ונשחק עד שהיה חלק, בעיקר בטבעת החיצונית הגושית, בסוף הטיפוס שלו. Phobos הגיע רק אל השוליים הדלילים והגזיים של טבעת הולכת ודועכת: הוא קיבל די מהירות כדי לא ליפול, נחרט בידי גז ולא הוחלק בידי מים, והתרחק לאט יותר מן הקו, שזז החוצה ככל שמאדים האט. הקו השיג אותו ליד 19,000 ק"מ, כשהיממה הייתה כ-22 שעות, ומאז הוא נופל; הרצה לאחור של הנפילה שלו בפיזור של היום מציבה אותו ב-19,100–19,500 ק"מ לפני 3.9–4.5 מיליארד שנה. הטבעת הפנימית נפלה בחזרה כאבק; השאר התאדה. המסה שעזבה דרך הקו, בסדר גודל של 5–20% מן המסה ההתחלתית ורובה חומרים נדיפים, לקחה איתה כ-92% מן הסיבוב, ומאדים האט והתכווץ למצבו של היום. המים שלא עזבו נשארו אטומים מתחת לקרום, שם מצא אותם InSight.

חלק II — העדויות. ל-Pavonis Mons, ב- 1.48° צפון, הקרוב ביותר לקו המשווה מבין ארבעת הרי הגעש של Tharsis, יש בפסגה בור עגול יחיד ברוחב 47 ק"מ ובעומק של כמעט 5 ק"מ, חבית תלולת דפנות שיחס העומק לרוחב שלה כ-0.10; הנפח שלו, 8,300–8,700 קמ"ק, הוא בקנה המידה של שני הירחים יחד, 6,740 קמ"ק — הגג של תא שקרס אחרי היריות. Olympus, ב- 18.65° צפון, היה מתחיל ירח במסלול נטוי בכ- 19° . Deimos חלק ומעוגל, והשקעים שלו רדודים (עומק חציוני של כ-2% מן הרוחב, מול 5.5% על Phobos); הוא יצא גדול יותר ממה שהוא עכשיו, אחרי שאיבד 30–60% ממסתו, אבל לא גדול מ-Phobos. Phobos איבד כ-1%: החריצים שלו הם השריטות של הצינור, הקמטים שלו — ההתכווצות של גוף מתקרר, ו-Stickney — הסימן של גוף מוצק שעמד בטבעת ופגע ב-Phobos חם. לשני הירחים קצה חד וקצה קהה, והקצה הקהה פונה אל מאדים: החוד נוצר בידי הזרימה מאחור, והנעילה הגאותית סובבה אותם מאוחר יותר. השקעים בשניהם קופלו פנימה, משום שנפגעו כשהגופים היו חמים ופלסטיים; הירחים הם דגימות של מאדים צעיר שהיה ספוג במים מתחת לפני השטח שלו. הירח של כדור הארץ מעולם לא עבר דרך טבעת, ושמר על המכתשים שלו.

חלק III — החיזויים. שבעה חיזויים נותנים ערך, מכשיר ותאריך, מול מה שההסבר המקובל מצפה לו באותו מקום: חומר של Phobos על קו האיזוטופים של מאדים בחמצן, בכרום ובטיטניום, בלי רכיב של גוף פוגע, בלי הסטה של התאדות באבץ ובאשלגן, ועם בועות סגורות של קצף שהתקרר; בורות שלעולם אינם חוצים חריצים, ושפות חריצים חדות; השקעים הרדודים של Deimos וההרכב שלו, זהה לזה של Phobos; חוסר מסה מתחת ללוע של Pavonis; מרכז המסה של Phobos מוסט לעבר מאדים, לעבר הקצה הקהה שלו; קרום אמצעי רווי מים מתחת ל-Tharsis; ובאבק של מאדים — רכיב עתיק, בן יותר מ-4 מיליארד שנה, עם גרגרים הנושאים הליום ונאון של רוח השמש, הנפוץ ביותר ברצועה המשוונית. משימת Martian Moons eXploration של JAXA, ששוגרה באוקטובר 2026, תנחת על Phobos ב-2027 ותחזיר את הדגימות שלה ב-2031; נספח מונה ארבע-עשרה מדידות מוצעות, משימה אחר משימה. ההסבר דורש מאדים צעיר מהיר ומורחב, מאדים רך, את הדחיפה הכלואה של הגז — הצעד הקריטי שלו — ואת הטבעת.

C.11 מאמר 11 — הדרישות (The Requirements)

הטענה

ירח שנבנה בדרך הזאת חייב להיראות באופן מסוים, והוא אכן נראה כך. מאמר 11 מציג שמונה עשרה דרישות — שבע תכונות קלאסיות, שלושת אזורי החשיפה, שבע הנובעות מן האגס ושלוש שהוסיפו המאמרים המאוחרים — כל אחת עם הגודל שבדק אותה, ומדווח עליהן אחת אחת במקום לחבר אותן לציון. החזקה שבהן, הסידור של הקרום ושל המכתשים העתיקים סביב הציר של המגע הישן, הורצה מול הנתונים עם ספים שנקבעו מראש: שניים מן המבחנים שלה עברו; בשלישי, הקרום דק ביותר במגע ועבה ביותר בצד הרחוק בכל ארבעת מודלי הקרום, כפי שנחזה, והניגוד, כ-10 ק"מ, הוא מספר לכיול.

חלק A — שבע הדרישות וההנחות שלהן. דרישה היא תכונה שהירח או כדור הארץ חייבים שתהיה להם אם הירח נוצר בדרך הזאת; לכל אחת מצרף המאמר את ההנחה הפיזיקלית הדרושה כדי לגזור אותה, כך שכל מבחן מצביע על החלק של המודל שבו הוא נוגע. R1, קרבה לחומר ארצי: יחסי האיזוטופים של הירח, תווית מקור שעיווד מאוחר כמעט אינו מזיז, חייבים להיות ניתנים להשגה כתערובת אחת של שני המקורות הארציים של מאמר 3 — ההזנה העמוקה והקליפה הסיאלית העולה. R2, ליבה מתכתית קטנה: כל המתכת של הירח ארצית; הרבה ברזל נכנס לאגס, ופחות ממנו לכיוון קצהו, וההזנה שהגיעה אל הירח הייתה בעיקר סליקט עם מעט מתכת. הליבה קטנה משום שרוב חומרי הליבה חזרו אל כדור הארץ: בניתוק החומר הליבתי הכבד היה בשליש האחרון של הגוף, לא חצה את קו הקורוטציה, וחזר במורד האגס. לליבה של 1.4% מן המסה ולחלק עמוק של 0.95, המתכת שהגיעה אל המרכז חייבת להיות כ-1.47% מן החומר המוזן, כך ש"מעט מתכת" הופך למספר

שמאמר 3 חייב להסביר. R3, אסימטריה הקשורה לפתח: הצד הרחוק נושא קרום עבה של שכבות רבות של סיאל דחוס, שנדד אל הקצה בתקופת הבליטה בכוחות הסיבוב, יחד עם חומר שחזר אליו שוב ושוב; הצד הקרוב היה הבסיס. R4, הכיוון: צד החיבור פונה אל כדור הארץ, כפי ששני רקדנים האוחזים ידיים פונים זה אל זה בזמן ששניהם מסתובבים ביחס לחדר. R5, סדר שימור: הצד הרחוק שמר את התייעוד שלו לפני שהצד המזון נרגע, והימות שלו שקטו כשההתקררות סיימה את הלחץ הפנימי שלהם. R6, חומרים נדיפים בכמות ובמצב הפאזה שההזנה נזקקה להם, בכל עומק. R7, מרכז המסה: קרום קל שהתעבה בצד אחד מזיז את נקודת האיזון לצד השני, כפי שכדור עם טלאי עבה של שעם בצד אחד מתאזן מחוץ למרכזו. מאמר 10 הוא מבחן נפרד; התוצאה שלו אינה משנה את הפרמטרים של מקרה כדור הארץ-ירח.

חלק B — הדרישות מול המדידות. כל דרישה מועמדת ליד המדידה שלה, והמילים "מתיישב", "פתוח" ו"נכשל" משמשות במובן מדויק. הפרש החמצן בין כדור הארץ לירח הוא $\Delta^{17}\text{O} = -1 \pm 5$ ppm: עבור LEF זה מה שצפוי, לא מה שיש להסביר; המאזן הרב-מערכתי פתוח (B.1). הליבה הסייסמית מגיעה לרדיוס של כ-330 ק"מ, כ-1.4% מן המסה (B.2). GRAIL מוצאת שהצד הרחוק עבה יותר; הקליפה על הכיפה של מאמר 3, 2.85×10^{21} ק"ג (3.9% ממסת הירח), מתאימה לקרום של חצי כדור רחוק בעובי 55 ק"מ, 2.6×10^{21} ק"ג, בתוך כ-10% בלי שום פרמטר שכוון ביניהם, ואילו הקרום של הצד הקרוב, הסיאל של הבסיס שקולף יחד עם הגוף, כ- 1.5×10^{21} ק"ג, הוא איבר נפרד (B.3). הסינכרוניות של היום היא מבחן חלש (B.4). ארבעה שעונים — התגבשות, "גיל הפגיעה" של הספרות, מילוי בזלתי וחשיפה — מותר להשוות רק בתוך סוג אחד, כפי ששריפת הלבנים, שרפה מאוחרת, שכבת צבע ובליית החזית הם ארבעה תאריכים אמיתיים של בית אחד (B.5). תכלילי התכה מחזיקים ppm 1,410–615 מים, שנכלאו בהם כשנוצרו: הירח היה רטוב אז, כשכמויות עצומות של חומרים נדיפים היו בתוך החומר שלו ומסביבו; מאז הם התאדו לחלל, והפנים שנמדד היום יבש. הכמות שההזנה נזקקה לה עוד צריכה להיגזר (B.6). קרום בצורה שמודלה מסיט את מרכז המסה לעבר הצד הקרוב ב-1.24–3.11 ק"מ לניגודי צפיפות של 300–750 ק"ג/מ"ק, מול כ-2 ק"מ שנצפו — טווח רגישות, לא חיזוי (B.7). אחר כך R8, אזורי החשיפה (B.8): המגע נחשף אחרון, הטבעת של הבסיס — בזמן ההתעגלות, לפני השטח של הכיפה — מן ההתחלה, כך שהירח מסודר בשלושה אזורים סביב הצד הקרוב. חמישה מבחנים נקבעו לפני שהנתונים נפתחו, והימות אינם ממוסכים, משום שהם חלק מן החיזוי. המבחנים הורצו בספטמבר 2026 על ארבעת המודלים של עובי הקרום של GRAIL ועל הקטלוג של Robbins, סביב הציר של הנקודה הפונה אל כדור הארץ ועם הגבולות של אז: דיסקת המגע (0°–41°), חגורת השוליים (41°–90°) והצד הרחוק (90°–180°). T5, מגמת העובי בשתיים עשרה חגורות של 15°: מתאם דרגות של +0.87 בכל ארבעת המודלים, מ-26.8 ק"מ ב-30° עד 45.6 ק"מ ב-165°–180°, מונוטוני לאורך עשר חגורות רצופות, מול -0.43 ו-+0.43 סביב הקטבים — הציר החזוי מסדר את הקרום טוב יותר מכל ציר ביקורת; עובר. T2, מכתשים בקוטר 20 ק"מ ומעלה: 164, 99 ו-219 למיליון קמ"ר בשלושת האזורים, יחסים של 1.34, 2.21 ו-1.65, כל אחד מעל סף המעבר שלו; עובר, והסדר שורד את מסכת הימות המקובלת. T1, הניגוד בין הצד הרחוק לדיסקת המגע: 9.65, 10.0, 10.3 ו-10.6 ק"מ במודלים 1–4, והסדר — דיסקת המגע הדקה ביותר, אחריה החגורה, והצד הרחוק העבה ביותר — נשמר בכל הארבעה; התחזית היא הסדר, וגודל הניגוד, כ-10 ק"מ, הוא מספר לכיוול. שאר התנאים שנקבעו מראש — יחס רחוק/שוליים של 1.1 לפחות, סדר מונוטוני, ואין ציר ביקורת עם מגמה חדה יותר — התקיימו. בחישוב מחדש על הגאומטריה הנוכחית — מרכז המגע ב-24.1° צפון 335.2° מזרח, כיפת המגע 0°–31°, החגורה 31°–70° והחלק הרחוק 70°–180°, כפי שכלל ההעתקה של מאמר 3 ממקם אותם — צפיפויות המכתשים, כשהימות ו-South Pole–Aitken מוצאים משני הצדדים, הן 53, 187 ו-220 למיליון קמ"ר (רחוק/חגורה 1.17, רחוק/כיפה 4.15, חגורה/כיפה 3.55), והקרום של מודל 1 הוא 26.3, 30.3 ו-36.2 ק"מ כשהימות נשארים (רחוק פחות כיפה 9.9 ק"מ), ו-31.3, 33.0 ו-38.9 ק"מ כשהימות ו-South Pole–Aitken מוצאים (7.5 ק"מ): הסדר נשמר בשתי הספירות. משום שצד רחוק עבה, מרכז מסה מוסט וימות בצד הדק הם פיזור אחד של חומר הנראה בכמה דרכים, השורות אינן מחוברות לציון (B.9).

חלק C — חתימות נוספות של העלייה ושל החיבור. חתימות שרק הדרך הזאת חוזה. הקליפה הקשיחה נשאה את המכתשים שלה שלמים ושמרה על גודלם — הקוטר החציוני הקוטבי גדול פי 1.06 מן המשווני — בזמן

שההתעגלות דחסה אותם, מ-1.09 ב-20–30 ק"מ עד 1.53 ב-60–100 ק"מ (C.1). אזור המקור על כדור הארץ הוא בסיס האגס ליד Kiritimat, והקצה ב-9.3° צפון 169.3° מזרח (מאמר 9); על הירח, הגבעה שממנה נבנה הגוף מרוכזת ליד 16.6° צפון 13.1° מזרח והמגע האחרון ליד 24.1° צפון 335.2° מזרח, עם Imbrium כיציאה הראשית ו-Serenitatis כמשנית — קרוב לקו הרוחב של 22.5° שבו, לפי מאמר 4 (The Orbit), עזב הירח (C.2). הפתחים מתחלקים לשלוש קבוצות — על הכתר, על הדופן ומתחת לבסיס — לפי משך הזמן שבו כל אחד היה פתוח לחלל (C.3). הגוף התעגל כשהיה מחובר ועזב עגול עם קליפה קשיחה, בקילוף: על פני הבסיס ברוחב 6,000 ק"מ, הסיאל גלש במעלה האגס לעבר הקצה, בכיוון ההתמיינות החיצונית, כשהגלישה הוקלה תחת כוחות הגזירה בזכות השכבה ה"משומנת" שבין הסיאל לסימה, ונפרד מן הסימה כפי שסרט הדבקה המורם מקיר צבוע לוקח את הצבע ומשאיר את הטיח; על פני המגע ברוחב 3,000 ק"מ, החום התיך את הסיאל; ומעט אחרי שמרכז המסה של הגוף הגיע אל קו הקורוטציה, כ-210 ק"מ מעבר לו, אחרון המגע נמשך לחופשי בכוח. לא היה צוואר (C.4). קשר בין אונת ההזנה לבין המבנה העמוק של היום נשאר כיוון מחקר (C.5). האגס מוסיף שבע דרישות (C.6): R9, אגס ברוחב של כ-9,000 ק"מ בתוך קו הקורוטציה, שהוא חלק מכדור הארץ ומוחזק בכבידה של כדור הארץ כמו כל חלק אחר שלו, ואינו נזרק החוצה משום שמהירותו אינה מהירות זריקה ומשום שלא חצה את קו הקורוטציה; R10, תשע עד שתיים עשרה מסות ירח, שנגזרו במאמר 3 מרוחב הבסיס, נאספות בחזרה בשלמותן אל כדור הארץ בלי שדבר נשאר במסלול; R11, הבסיס מעל האזור האיטי של האוקיינוס השקט (LLVP) — אזור איטי גדול במעטפת התחתונה, שאנו מציעים שהוא ברובו האגס שחזר, חלק מן החומר הממוין ששב אל כדור הארץ; R12, התוריום של המגע, שבא מעומק כדור הארץ; R13, הליבה כמדד למידת הקרבה של ההזנה אל הברזל היורד; R14, אין חומר זר מעבר לכמויות זעירות; R15, דחיסה קוטבית לפי גודל — נמדדה ועברה. המאמרים שנסגרו אחרי האגס מוסיפים שלוש (C.7): R16, 34 הימות כפתחים וכמקור החומר החוזר, נתמכת ב-0.8 מכתשים חדים בקוטר 20 ק"מ ומעלה למיליון קמ"ר על רצפות הימות, מול 18.3 במישורים ו-207 ברמות (מאמר 6, The Craters); R17, שתי יציאות מתחת ל-South Pole–Aitken עם הכיפה דרומית לשתייה, ב-17–21° על הצורה הפחוסה וב-24–29° על הכדור של היום (מאמר 8, South Pole–Aitken); R18, המקור של Tharsis על קו המשווה של מאדים כש-Deimos עזב (מאמר 10).

חלק D — עקביות בין המאמרים ומסקנות. טבלה מונה מה כל מאמר מוסר למאמר הזה ואת התנאי שהוא עדיין משאיר: קורוטציה אינה מוכיחה כשלעצמה שחרור (מאמר 2); המאזן הרדיאלי עובר רק ממעבר ברדיוס של כ-1,000 ק"מ המחזיק 0.46 מסות ירח תחת עומס צידי בסדר גודל של 10^{22} ניוטון — ולכן החיבור הוא הבסיס הרחב של הכיפה ולא גבעול (מאמר 3); הצמיגות של הקליפה, $\approx 10^{23}$ פסקל-שנייה, נדרשת ולא נמדדה (D.1). הכרונולוגיה היא אילוף מרכזי: שעון הפניום-טונגסטון, עם זמן מחצית חיים של 8.9 מיליון שנה, משאיר כ- 5.1×10^{-21} מן ההורה שלו אחרי 600 מיליון השנים של ציר הזמן של הסדרה — כ-400 לבליטה ולאגס, כ-100 לפחיסות וכ-100 נוספים עד השחרור לפני 3.873 מיליארד שנה — כך שחתימות הטונגסטון נקבעו מוקדם וחייבות להישמר לאורך החלון בלי איפוס; היסטוריה עקבית של המאגרים — לחישוב (D.2). מפה אוספת כל טענה עם המבחן שלה ועם הענף של המודל שהיא נוגעת בו (D.3). החידוש הוא הצירוף, לא תהליך בודד כלשהו: פנים שהוזן מלמטה בזמן שהעור שלו היה הקליפה של כדור הארץ עצמו שהורמה על הכיפה (D.4). שבע מסקנות נובעות, כל אחת עם משמעותה: T5 ו-T2 של R8, R15, R16 ו-R17 עברו או נתמכים (D.5).

נספח A — שחזור חישוב מרכז המסה. האינטגרציה הקצרה שמאחורי ההסטה: החלק הסימטרי של הירח אינו תורם דבר, ורק המעטפת הצפופה יותר, המגיעה גבוה יותר מתחת לקרום הדק, מזיזה את נקודת האיזון. עם $M_L = 7.35 \times 10^{22}$ ק"ג, $R_L = 1737.4$ ק"מ, קרום ממוצע של 45 ק"מ ומשרעת של 15 ק"מ, ההסטה היא המשרעת מוכפלת ביחס בין ניגוד הצפיפות לצפיפות הממוצעת של הירח. הנספח מראה גם שמרכז המגע, 24.1° צפון 335.2° מזרח, נמצא 34.0° מן הנקודה שמתחת לכדור הארץ, כך שההסטה המחושבת אינה חייבת להצביע ישר לאורך קו כדור הארץ הממוצע, והמבחן משווה כיוון ולא רק אורך.

נספח B — מפת המחקר הקודם והחידוש. כל רכיב מסווג כפיזיקה סטנדרטית, תצפית קודמת, עבודה קודמת, השערת מודל, העבודה הזאת או חיזוי פתוח. המדידות של החמצן, הליבה, הקרום, הבזלת והמים שייכות למחקרים המצוטטים; הרעיון שכדור ארץ חם חימם את הצד הקרוב שייר ל-Roy ועמיתיו, ו-Procellarum כמערכת מאגמטית — ל-Andrews-Hanna ועמיתיו; מה שהסדרה מוסיפה הוא ההזנה הפנימית והעלייה של הקליפה החיצונית בעת ובעונה אחת, והמבחן המשותף של עובי, מסה והסטה במודל אחד.

מה מבסס חלק C. כשקוראים אותם לפי הסדר, עשרת המאמרים מספרים תהליך אחד ומשאירים עקבה מדודה בכל שלב. מאמרים 2 ו-3 מראים שגוף שנבנה מחומרו של כדור הארץ עצמו על קצה אגס שוחרר במקום שבו התנועה שכבר הייתה לו הייתה התנועה של מסלול, ומאמר 4 נושא אותו מ- 22.5° ומ-17,496 ק"מ אל המסלול של היום. מאמרים 5 (The Maria) עד 8 קוראים את הירח כתייעוד של הבנייה הזאת: הימות כפתחים, המכתשים כחומר חוזר שנחת ונישא על קליפה קשיחה, הקטבים (The Poles, מאמר 7) דחוסים בידי ההתעגלות, ו-South Pole–Aitken כסימן של הברנר בצד הרחוק. מאמר 9 מוצא את הקצה השני של אותו אירוע על כדור הארץ — הקיר המוביל של האגס שנקפל לפסים, ומקום הקצה בין הכיפופים שלהם — ומאמר 10 עוקב אחרי אותו רעיון על מאדים בדרך אחרת — שני פקקים של קרום שנורו מצינור אחד, ומסלוליהם הושלמו בידי טבעת — ונותן שני ירחים קטנים והסיבה שאחד מהם נופל. מאמר 11 אוסף את מה שכל זה דורש ומנסח את המבחן של כל דרישה; מבחן המפתח, הסידור של הקרום ושל המכתשים העתיקים סביב המגע הישן, הורץ: שניים מן המבחנים שלו עברו, הסדר נשמר בכל מודל, וגודל הניגוד בעובי הקרום, כ-10 ק"מ, נשאר לכויל. חלק D אוסף עכשיו את הרמזור של הסדרה.

חלק D — הרמזור של הסדרה

הבעיה והגישה

עשרה מאמרים מדדו או חישובו, כל אחד, את חלקו בתהליך, וכל אחד מהם שפט את התוצאות שלו. קורא שרוצה לדעת היכן עומד המודל בשלמותו לא צריך לפתוח עשרה מאמרים. **הגישה:** כל מחקר וכל תצפית שמאמר בסדרה נתן להם מעמד מוצבים בטבלה אחת, עם המספר שלהם והאור שלהם ברמזור; אחר כך מפורטים הנתונים שבהם השתמשה הסדרה, כדי שהקורא יוכל לראות מה נמדד על ידי הסדרה עצמה, ועל מה.

חלק C הציג את המאמרים אחד אחד. החלק הזה מביט על פני כולם יחד. הוא אינו שופט דבר מחדש: כל אור ברמזור שלהלן הוא האור שהמאמר נתן לתוצאה שלו, או — במאמרים 2–4, שמחשבים ואינם מודדים — המעמד שהמאמר עצמו מצהיר עליו לכל טענה. המטרה היא מבט אחד — הסדרה כולה בטבלה אחת — וספירה ישירה של מה שנמדד ומתאים, מה שמתאים בחלקו או ממתין למחקר, ומה שבוטל.

D.1 טבלה אחת: כל מחקר וכל תצפית, עם האור שלהם ברמזור

שלושת הצבעים. ירוק פירושו שהשערת המחקר, שנוסחה לפני המדידה, עמדה במלואה על המדגם שנמדד — או, במאמרים 2–4, שהחישוב נסגר על הקלטים המוצהרים. שורה ירוקה עדיין יכולה לציין מגבלה (מדגם קטן, מבחן משנה שעדיין אינו עובר את רמת המקרה) כאשר המגבלה הזאת אינה סותרת את ההשערה. כתום פירושו שחלק אחד עמד וחלק אחר עדיין לא נפרד, או שהתוצאה מנוסחת כדרישה וממתינה לחישוב או למדידה שיכריעו בה. אפור מסמן מחקר שבוטל; המספר שלו נשמר כדי שהמספור של המאמר לא יופר. אין בסדרה אף מחקר אדום. T1 של מאמר 11, שבו הסידור החזוי מתקיים בכל ארבעת מודלי GRAIL וגודל ניגוד הקרום, כ-10 ק"מ, נשאר לכיול, מסומן בכתום, כתוצאה שבה חלק אחד עמד וחלק אחר ממתין לכיול.

כיצד נלקחו השורות. מאמרים 5, 6, 8 ו-9 נחתמים כל אחד בטבלת רמזור משלו (מאמר 5, M.2§; מאמר 6, O.2§; מאמר 8, G.1§ וההכרעות של B.18§; מאמר 9, חלק H); האורות שלהם הועתקו ללא שינוי. מאמר 7 נותן תוצאה לכל אחד מחמשת המבחנים שלו (D§); "עובר" הוא ירוק, "עקבי" עדיין לא מכריע" הוא כתום. מאמר 10 מדרג את החוליות של התיאור שלו במפת היתכנות (G.5§); חוליות שחושבו ועומדות הן ירוקות, וחוליות שחושבו על קלט מוצהר, שנוסחו כדרישה או שממתינות לנתונים הן כתומות. מאמר 11 נותן את מצבה של כל דרישה (B.9§) ואת התוצאות של מבחני אזורי החשיפה (B.8§). מאמרים 2, 3 ו-4 מצהירים על המעמד של כל טענה בסיכומים שלהם ובטבלאות המבחנים שלהם (מאמר 2, C.1§ ו-D.1§; מאמר 3, D.1§ ו-E.4§; מאמר 4, חלק E). המספר בעמודה השלישית הוא המספר שהמאמר מדווח; הסעיף שבו הוא מוצג בפירוט מצוין בטבלה של המאמר עצמו.

ירוק נמדד או חושב, ומתאים כתום — חלקי / ממתין טרם הוכרע מבוטל

מאמר	מחקר או תצפית	תוצאה	מעמד
מאמר 2 — מנגנון LEF בעיקרון (LEF Mechanism in Principle) ירוקים • 1 כתום 7			

2	פער המהירויות	על קו הקורוציה (המרחק שבו גוף שמסתובב עם כדור הארץ כבר נע במהירות של מסלול חופשי) מהירות הסיבוב היא המהירות המסלולית: 15,818 ק"מ, 5,020 מ"ש' לגוף אם שיומו 5.5 שעות (על פני השטח 2,133 לעומת 7,701 מ"ש')	ירוק
2	האגס	אגס רציף מגשר בין כדור הארץ לבין הקו; הירח משתחרר בשלמותו	ירוק
2	ההיסט של היום	האגס והברזל השוקע יחד: 5.77 שעות בשחרור (האגס לבדו, 6.44 שעות)	ירוק
2	קורוציה בשחרור	מרכז המסה על הקו: 16,399 ק"מ (שני גופים); 16,331 ק"מ (לחלקיק בוחן)	ירוק
2	תנע זוויתי	פי 1.007 מן התנע של היום (גרסה קודמת נתנה 1.008); הדרך הקלסית דורשת פי 2.74	ירוק
2	גבול רוש	קשיח ועגול: יחס צירים $1.04 \leq \mu \leq 10$ ג'יגה-פסקל; 16,400 ק"מ נמצאים מעבר לגבול הקשיח (9,484–12,994 ק"מ)	ירוק
2	התפתחות גאותית	הירח מתרחק מרגע השחרור; מרווח של $\Delta r \simeq 2d_0$ מעבר לקו	ירוק
2	ריכוז הליבה במרכז	$D \approx 2$ במהלך ההעברה — דרישה: כדור הארץ מתמיין במהלך ההעברה, ולא אחרי השחרור	כתום — ממתין
מאמר 3 — מנגנון LEF בפועל (LEF Mechanism in Practice) ירוקים • 3 כתומים 4			
3	מבחן הלחץ	150.26 ג'יגה-פסקל במקור; התכה עמוקה קלה מכ-3,864 ק"מ/ג"מ"ק מגיעה אל קו הקורוציה (3,500 ק"מ/ג"מ"ק משאירה 10.49 ג'יגה-פסקל)	ירוק

ירוק	3 הגוף על קצה האגס לחצי כדור על בסיס של 6,000 ק"מ שמחזיק את מסת הירח יש צפיפות של 1,300 ק"ג/מ"ק ללא כוונון; כיפה של 3,650 ק"מ; שטח פנים פי שלושה מזה של חצי הכדור הרחוק
ירוק	3 שחרור על הקו מגע צמיגי משתחרר כ- $2d_0$ מעבר לקו: כ-210 ק"מ למגע בעובי של כ-105 ק"מ (מאמר 3, C.5a§)
ירוק	3 הבסיס מעל ה-LLVP של האוקיינוס השקט (LLVP) — אזור איטי גדול במעטפת (התחתונה) 5 מתוך 5 מודלים טומוגרפיים איטיים מתחת ל-Kiritimati; בתוך קו המתאר של -1% של SMEAN (-2.25%) ושל SMEAN2 (-2.36%)
כתום — חלקי	3 המבחן המשותף של לחץ, זרימה ועומס איזון רדיאלי מתקבל רק ממעבר של כ-1,000 ק"מ, שכבר מחזיק 0.46 מסות ירח, תחת עומס צידי מסדר גודל של 10^{22} ניוטון; צינור דק נכשל, והבסיס הרחב נדרש
כתום — ממתין	3 שני ה-LLVP ההרכב, הצורה ואיזוטופי הפלומות של ה-LLVP של האוקיינוס השקט לעומת האפריקני — עוד יימדדו
כתום — ממתין	3 הדרישות שמועברות הלאה יציבות תלת-ממדית, משוואת מצב עמוקה, מאזן אנרגיה, זמן הכשל של המגע — עוד יחושבו
מאמר 4 — המסלול (The Orbit) ירוקים • 4 כתומים 3	
ירוק	4 מקור הנטייה $i_0 = \lambda $: שחרור בקו רחב 22.5° נותן מסלול נטוי ב-22.5° למשווה של אותו זמן
ירוק	4 המסלול ההתחלתי שחרור כמעט מעגלי מ-22.5° ב-17,496 ק"מ, כ-210 ק"מ מעבר לקו (משוואות 6–7)
ירוק	4 התרחקות התחלתית $\langle \dot{a} \rangle > 0$ כבר מן המסלול הראשון

4 הישרדות	כ-7,200 ק"מ מעבר לגבול רוש הקשיח של 10,314 ק"מ — מבחן רוש עבר; בדיקת העיוות פתוחה	כתום — חלקי
4 הנטייה של היום	חוק מצומצם: 5.145° במרחק של היום, שווה לערך הנצפה — נדרשת האינטגרציה המלאה	כתום — חלקי
4 מרחק ושעון	כ-384,400 ק"מ ו-3.8 ס"מ לשנה היום; אין Q קבוע שמתאים לשניהם ($Q_{\oplus} \simeq 12$) נותן את הקצב, $Q_{\oplus} \simeq 29$ את 3.87 מיליארד השנים מאז השחרור) — נדרשת אינטגרציה	כתום — ממתין
4 הקשר הגאוגרפי	קו הרוחב הקדום של מרכז המסה, משוחרר באופן בלתי תלוי במסלול	כתום — ממתין
מאמר 5 — הימות (The Maria) ירוקים • 2 כתומים • 1 מבוטל 13		
5 1. הימות על כיפות ההזנה	33 מתוך 34 על כיפה; אף אחת מ-20,000 קבוצות אקראיות של 34 נקודות לא הגיעה ל-33	ירוק
5 2. מבחן המקור	המכתשים נושאים את הברזל של הקרקע שלהם, והוא יורד עם המרחק: 6.9 עד 3.1 אחוזי משקל FeO בטווח של 150 ק"מ, ביקורת 2.3	ירוק
5 3. אגן או מכתש: הקפיצה של הקרום	הקפיצה מופיעה מתחת ל-29 מתוך 36 פתחים מסומנים, לעומת 4 מתוך 169 מכתשים רגילים	ירוק
5 4. הכיפות הקבורות	44 מתוך 73 כיפות קבורות; הברזל והתוריום שווים לאלה של הקרקע שמסביב; הקרום עבה יותר ב-8–13 ק"מ	ירוק

ירוק	10 מתוך 12 ימות פתוחים (חציון –267 מ'; $\rho = -0.59$) ; היוצאים מן הכלל הם Serenitatis (60+ מ') ו- Imbrium (43+ מ'), שני הימות של המגע: Serenitatis קפא ראשון, קרוב מאוד לכדור הארץ, ונמשך החוצה יותר; Imbrium קפא אחרי הניתוק, כשהירח התרחק	5	5. המרכז שקע מעל הכיפה
ירוק	16 מתוך 16 במפלס אחד, מתחת לשפה (חציון 3.4 ק"מ) ומתחת לקרקע שמסביב (חציון 1.6 ק"מ); במקרה — פעם אחת ב-65,000	5	6. רצפה אחת
ירוק	חלק אחד משנים-עשר מן המכתשים של 2–5 ק"מ שבקרקע שמסביב; כל רצפה נקייה יותר בכל גודל	5	7. רצפות נקיות
ירוק	מכתשים נעלמו לתוך הרצפות; החלק המותך עולה עם הגודל; מכתשים קטנים חדים על המגע (משותף עם מאמר 6, מחקר 5)	5	8. גודל ומצב
ירוק	העודף של הימות מגיע עד 600 ק"מ	5	9. טבעות של ברזל וטיטניום
ירוק	המגע, 17.5% משטח הפנים, מחזיק 95% מן התוריום שמעל 3 ppm; מרכזו, שנקבע מראש, שלישי מתוך 16,200, 47 ק"מ מן המרכז הטוב ביותר	5	10. התוריום והמגע
ירוק	אם קוראים אותם כאגנים של גופים מבחוץ, הימות דורשים כ- $10^{19} \times 1$ ק"ג של חומר זר; ההתכות אינן נושאות שום חומר זר ידוע	5	11. המסה הזרה
ירוק	מסודר בכל גודל החל מ-2 ק"מ; הימות של המגע הם הנקיים ביותר	5	12. סדר הקפיאה

כתום — חלקי	התוריום עמד: הרצפות של המגע עניות בשליש מן המישורים שלהן; חלק הטיטניום לא הפריד בין האזורים	5 13. תוריום וטיטניום
מבוטל	בוטל; המספר נשמר	5 14. —
ירוק	השפה אבדה, והרכס ששרד הוקהה, רק בצד של המישור החם ורק במגע; השוואת רכסים מותאמת על ארבעה זוגות	5 15. המישורים של המגע
כתום — חלקי	מעל הביקורת סביב הימות הרחוקים, ובמידה הגדולה ביותר סביב הקבורים; סביב 10 הימות הרחוקים הפתוחים (חציון 207 מ') לא נפרד	5 16. הצווארון של הימות הרחוקים
מאמר 6 — המכתשים (The Craters) ירוקים • 3 כתומים • 1 מבוטל 11		
ירוק	249–252 ל- 10^6 קמ"ר ב- 90° מזרח לעומת 139–175 ב- 90° מערב; יחס 1.79 (2.05–1.56)	6 1. כמה מכתשים, לפי קו אורך
ירוק	FeO של 5.96 אחוזי משקל בטווח של 50 ק"מ משישה ימות, לעומת 2.30 ב-5,922 ביקורות; עודף עד 600 ק"מ	6 2. מבחן המקור
ירוק	אין עודף על הכיפות הקבורות; המכתשים הגדולים באים מימות נראים ומכיפות קבורות כאחד	6 3. הכיפות הקבורות והמכתשים הגדולים
ירוק	49 מתוך 79 מכתשים של 10 ק"מ ומעלה הותכו, והחלק עולה לעבר המגע (סיכוי מקרי של כ-3 למיליון); אין אף מכתש של 20 ק"מ ומעלה על 703,000 הקמ"ר של רצפות המגע	6 4. מכתשים שהותכו לתוך הרצפות
ירוק	0.8 מכתשים חדים של ≥ 20 ק"מ ל- 10^6 קמ"ר על הרצפות, לעומת 18.3 על המישורים ו-207 ברמות	6 5. גודל ומצב על הימות

כתום — חלקי	6. שפה, רצפה ופסגה לפי קו אורך	6	נחיתה קשה ב-90° מערב (שפות משוננות פי 1.14–1.25 מאשר ב-90° מזרח); חלק מרווחי הסמך של השפות הגדולות יותר כוללים את האפס
ירוק	7. פנים המכתש	6	חומר אחד מן המרכז ועד השפה; 1,214–1,235 זוגות, וכל רווח סמך בין החצאים כולל את האפס
ירוק	8. המסה הזרה	6	המכתשים הנראים דורשים $4.4 \times 10^{19} - 5.0 \times 10^{19}$ ק"ג; הקרום מחזיק 0.9%–2% לעומת 2%–6% הנדרשים (גרסה קודמת נתנה 2%–5%); הרוותניים ארצי
ירוק	9. כדור הארץ כמפזר האחרון	6	עודף בצד הקרוב של המכתשים הקטנים האחרונים, 1.12–1.27, לאחר הסרת המכתשים המשניים
ירוק	10. הרצפות המורמות	6	כשליש מן הרצפות הגדולות נמצאות מעל הבזלת שבחוץ; 84 מתוך 86 על המישורים
כתום — חלקי	11. הברזל של רצפות גבוהות ונמוכות	6	הרצפות הנמוכות עשירות יותר; מול הבזלת שממש בחוץ, 0.44–0.64 לעומת 0.64–0.84 אחוזי משקל, לא מעבר לרמת המקרה
כתום — חלקי	12. החומר שאחרי השחרור	6	חומר הפליטה של המכתשים עני יותר בברזל מן הבזלת; בין המכתשים שבתוך הבזלת — בתוך הפיזור של המפות
מבוטל	13. —	6	בוטל; המספר נשמר
ירוק	14. המסה שמתחת למכתשים המותכים	6	יותר מסה מזו של הרצפה שלהם ב-13 מתוך 16 ($p = 0.04$, Wilcoxon); אין עודף כזה מתחת למישורים
ירוק	15. השפה: נשחקה בחום או הוצפה	6	אבדה רק בצד של המישור החם ורק במגע; השוואת רכסים על ארבעה זוגות

מאמר 7 — הקטבים (The Poles) ירוקים • 1 כתום 4			
ירוק	D.1 7 יחס הצפיפות	1.20 ± 0.05 נקי (הימות ו-SPA הוסרו משני הצדדים); 1.09 ב-20–30 ק"מ, ועולה ל-1.53 ב-60–100 ק"מ	
ירוק	D.2 7 קטרים	חציון קוטבי 1.06 (1.01–1.12) באותו סף: המכתשים שמרו על גודלם	
כתום — חלקי	D.3 7 מכתשים צעירים	0.92 (0.39–2.04) ו-1.12 (0.60–2.03): עקבי, עדיין לא מכריע	
ירוק	D.4 7 צפון ודרום	דרום/צפון 1.02 (0.78–1.32) ב-15°	
ירוק	D.5 7 גודל המכתש	הגדולים ביותר ליחידת שטח 1.16 (1.04–1.29); ישנים/טריים 1.02 (0.89–1.16); 4 מתוך 5 מבחני הגודל עוברים	
מאמר 8 — ירוקים • 1 כתום 6 South Pole–Aitken			
ירוק	8 1. תיעוד המכתשים	בטבעת המרכזית 0.51 מן הצפיפות שבחוץ, בהשוואה של שווה מול שווה; המינימום ב-45.4° דרום, 197.9° מזרח, על קו האורך שמול Serenitatis	
ירוק	8 2. העומק מול הקרום הדק	שארית של 1.1–1.8 ק"מ במרכז, יורדת ל-0.2–0.3 ק"מ בשפה	
ירוק	8 3. הטבעת החיצונית	קרום מעובה ב-7 מתוך 8 כיוונים, עבה במזרח; מחזיקה כ-37% מן הקרום החסר	
ירוק	8 4. הטבעת הפנימית	קיימת ב-22 מתוך 24 כיוונים; מרכזה ב-51.4° דרום, 196.8° מזרח, 118 ק"מ מזרח-צפון-מזרח למרכז האגן	
ירוק	8 5. נקבוביות בעומק	בעומק 10 ק"מ: 2.9%–4.4% במרכז, 7.1%–8.8% בשפה, 6.2%–12.8% מסביב	

ירוק	המודל מתאים ל-16 מתוך 17 (המדע המקובל: 6 במלואו, 9 בחלקו, 1 בקושי, 1 לא)	8 האנומליות B1-B17
כתום — חלקי	Ni/Co וגרגירי ברזל-ניקל; גילים של 4.247 ו-3.873 מיליארד שנה — מתאים בחלקו; האיזוטופים יכריעו	8 B14 מתכת בנוריטים
מאמר 9 — הפסים (The Stripes) ירוקים • 4 כתומים 5		
ירוק	1.6° ממנו, לנטייה של 10°–14°	9 הבסיס על המשווה של הפסים
ירוק	3,360 ק"מ, לעומת המגע של 3,000 ק"מ והכיפה של 3,650 ק"מ	9 רוחב קצה האגס
ירוק	9,360 ק"מ מקצה האגס ועד הקצה המזרחי, לעומת אגס של 9,800–9,680 ק"מ	9 אורך הפסים
ירוק	תמונת ראי בקנה מידה של 1.37× Imbrium במקומו; Serenitatis ומרכז המגע בתוך קצה האגס	9 הצד הקרוב על כדור הארץ
ירוק	נצפו בארבע חציות	9 הפסים מתחת לרכסים
כתום — חלקי	קשתות מקומטות ממערב לקצה האגס, 8,100–10,300 ק"מ מן הבסיס	9 הצד הנגרר
כתום — ממתין	קריאה ראשונה על מבטים אלכסוניים	9 התכנסות ממערב לרכסים
כתום — ממתין	Marshall Line ו-לא התקדמות גילים של פלומה; ההשוואה עוד תיעשה	9 רכסי השפכטל
כתום — ממתין	המשטח המתוארך הוא השכבה האחרונה; הקיפול שמתחתיו ייבדק בחתכים סייסמיים	9 גיל קרקעית הים
מאמר 10 — מאדים (Mars) ירוקים • 6 כתומים 4		
ירוק	אנרגיה ותנע זוויתי: 2.44–2.89 ק"מ/ש' כלפי חוץ כדי להגיע אל הטבעת, מ-1.78 ק"מ/ש' של קו המשווה	10 מאזן המהירות

ירוק	10 המקום המשוני	Pavonis 1.48° צפון; שני הירחים בתוך 2° מקו המשווה; Olympus היה נותן כ-19°
ירוק	10 קנה המידה של הבור	הלוע של Pavonis, -8,300 קמ"ק, מול שני הירחים, 6,740 קמ"ק
ירוק	10 שני הפנים	יחס עומק לרוחב של השקעים: Deimos חציון 5.5% Phobos, 1.9% (מודלי צורה)
כתום — חלקי	10 דחיפת הגז	0.5–0.25 ג'יגה-פסקל לאורך 300–200 ק"מ, מול לחץ כליאה של 0.39–0.26 ג'יגה-פסקל; הצעד הקריטי, עוד ימודל
כתום — חלקי	10 הטבעת	לפחות 0.6 ממסת כל גוף בצימוד מושלם, ובפועל בסדר גודל של 10^{16} ק"ג; דרישה
כתום — חלקי	10 הטיפוס של Deimos	מ-15,000 ל-23,463 ק"מ ב-0.5–1 מיליארד שנה, למאדים שמפזר פי 8–20 מהיום
כתום — חלקי	10 המרוץ של Phobos	נלכד בידי הקו הנע ליד 19,000 ק"מ, יממה של כ-22 שעות; 19,100–19,500 ק"מ לפני 3.9–4.5 מיליארד שנה בפיזור של היום
כתום — ממתין	10 סיבוב ומסה שאבדו	כ-92% מן הסיבוב, עם 5–20% מן המסה ההתחלתית, דרך הקו; דרישה
כתום — ממתין	10 החומר, מרכז המסה, האבק	שבעה חזיונים; ממתנים לדגימות של MMX (2031) ולרגולית של מאדים שתוחזר
מאמר 11 — הדרישות (The Requirements) ירוקים • 5 כתומים 3		
ירוק	11 T5, R8: ייחודיות הציר	Spearman 0.87+) $p = 2 \times 10^{-4}$ סביב הציר הפונה אל כדור הארץ, בכל ארבעת מודלי GRAIL; צירי הביקורת -0.43 עד +0.76

ירוק	רחוק/שוליים 1.34, רחוק/דיסקה 2.21, שוליים/דיסקה 1.65 (Robbins, 6,973 מכתשים של $20 \geq$ ק"מ)	11 T2, R8: המכתשים העתיקים ביותר
ירוק	הקליפה 2.85×10^{21} ק"ג לעומת קרום הצד הרחוק 2.6×10^{21} ק"ג ב-55 ק"מ: הפרש של כ-10%	11 מאזן הקרום
כתום — חלקי	הצד הרחוק פחות הדיסקה 10.6 / 10.3 / 10.0 / 9.65 ק"מ במודלים 4–1; הסידור מתקיים בכל הארבעה; גודל הניגוד הוא מספר לכיול. בגאומטריה הנוכחית (מרכז המגע 24.1° צפון, 335.2° מזרח; 31° – 0° , 70° – 31° , 180° – 70°), מודל 1: 26.3 / 36.2 / 30.3 ק"מ, הצד הרחוק פחות המגע 9.9 ק"מ, הסידור מתקיים	11 T1, R8: עובי הקרום
כתום — ממתין	טרם הורצו	11 T3, R8 ו-T4: אגני מסקון
כתום — חלקי	3.11–1.24 ק"מ לניגודי צפיפות של 750–300 ק"ג/מ"ק, לעומת כ-2 ק"מ; מודל הצפיפות המשותף עוד ייבנה	11 R7: מרכז המסה
כתום — חלקי	חמצן 5 ± 1 ppm; ליבה של 1–2% מן המסה; מים ppm 1,410–615 בתכלילי התכה — לכל אחת מהן חסר חישוב הסגירה שלה	11 R1–R6
כתום — ממתין	מנוסחות עם המבחנים שלהן (C.6–C.7§); המיקום של R11 נמדד במאמר 3	11 R18, R9–R14

הרמזור של הסדרה: כל מחקר וכל תצפית שמאמרי הסדרה נתנו להם מעמד, לפי מאמר, עם התוצאה והאור. בשורת הכותרת של כל מאמר — מספר השורות בכל צבע.

כיצד לקרוא את הטבלה. קוראים אותה קודם לפי צבע, ואחר כך לפי מאמר. השורות הירוקות של מאמרים 5–9 ו-11 הן מדידות שהסדרה ערכה על נתונים ציבוריים, כל אחת מול השערה ומול קו מעבר שנקבעו לפני הספירה; השורות הירוקות של מאמרים 2–4 הן חישובים שנסגרים על קלטים מוצהרים; השורות הירוקות של מאמר 10 הן חוליות בתיאור של מאדים שנסגרות בחישוב. השורות הכתומות הן משני סוגים, והטבלה מבחינה ביניהן בניסוח של תא המעמד. "חלקי" מסמן תוצאה שבה חלק אחד עמד וחלק אחר עדיין לא נפרד — הטיטניום של מאמר 5, מחקר 13; השפות הגדולות יותר של מאמר 6, מחקר 6; ניגוד הקרום של T1, שבו הסידור מתקיים בכל ארבעת

המודלים וגודל הניגוד, כ-10 ק"מ, נשאר לכויל. "ממתין" מסמן דרישה או תחזית שעדיין לא הכריעה בה שום מדידה ושום חישוב — איזוטופי הפלומות של מאמר 3, האינטגרציה התרמית-מסלולית של מאמר 4, החתכים הסייסמיים של מאמר 9, הדגימות של MMX. אין אף שורה אדומה.

שלוש שורות צריכות הערה של רישום. מחקר 5 של מאמר 6 הוא מחקר 8 של מאמר 5 — מדידה אחת של המכתשים על רצפות הימות, שכל מאמר מונה בטבלה שלו; לכן יש בסדרה 88 מחקרים ותצפיות נפרדים (גרסה קודמת נתנה 89), ושני מספרים מבוטלים. הדרישות R15, R16 ו-R17 של מאמר 11 כבר עברו, אבל המדידות שלהן הן אלה של מאמרים 7, 6 ו-8, והן נמנות שם (מאמר 7, D.1–D.2; מאמר 6, מחקר 5; מאמר 8, האנומליות ואיור C.1). והספירה של T2 במאמר 11 משאירה את הימות בכל שלוש החגורות במכוון: הימות הם הקרקע הדקה והצעירה ביותר של דיסקת המגע, וזו התחזית עצמה; כאשר מחילים את מסכת הימות המקובלת על שלוש החגורות באופן זהה, היחסים הם 1.13, 1.37 ו-1.21 — אותו סדר (מאמר 11, B.8§).

הספירה, מאמר אחר מאמר. הטבלה שלהלן מסכמת את האורות. העמודה האחרונה מציגה את השורות של כל מאמר לפי צבע, באותו קנה מידה, כך שהקורא רואה מיד היכן הסדרה מדדה הכי הרבה והיכן היא עדיין ממתינה.

מאמר	נושא	ירוק	כתום	מבוטל	שורות
2	מנגנון LEF בעיקרון	7	1	—	8 7 ירוקים · 1 כתומים · 0 מבוטלים
3	מנגנון LEF בפועל	4	3	—	7 4 ירוקים · 3 כתומים · 0 מבוטלים
4	המסלול	3	4	—	7 3 ירוקים · 4 כתומים · 0 מבוטלים
5	הימות	13	2	1	16 13 ירוקים · 2 כתומים · 1 מבוטלים
6	המכתשים	11	3	1	15 11 ירוקים · 3 כתומים · 1 מבוטלים
7	הקטבים	4	1	—	5 4 ירוקים · 1 כתומים · 0 מבוטלים
8	South Pole–Aitken	6	1	—	7 6 ירוקים · 1 כתומים · 0 מבוטלים
9	הפסים	5	4	—	9 5 ירוקים · 4 כתומים · 0 מבוטלים

10	מאדים	4	6	—	10	4 ירוקים · 6 כתומים · 0 מבוטלים
11	הדרישות	3	5	—	8	3 ירוקים · 5 כתומים · 0 מבוטלים
הסדרה		60	30	2	92	

ספירת האורות לפי מאמר: ירוקים, כתומים ומבוטלים, ובשורה האחרונה — הסדרה כולה.

העמודה האחרונה מראה את צורת הסדרה. המאמרים שקוראים את פני השטח של הירח — הימות, המכתשים, הקטבים, South Pole–Aitken — ירוקים ברובם: הם נבנו כמדידות, כל אחת עם הסף שלה שנקבע תחילה, והם הורצו. המאמרים שבונים את המנגנון (2–4) ירוקים במקום שבו החישוב נסגר, וכתומים במקום שבו הם מעבירים דרישה לחישוב שעוד לא נעשה: היציבות ומשוואת המצב של ההזנה, האינטגרציה של המסלול. מאדים כתום יותר משהוא ירוק, משום שהחוליות שלו ממתינות למודל של דחיפת הגז ולמשימה אחת. מתוך 92 השורות, 60 ירוקות, 30 כתומות ואף לא אחת אדומה. הספירה אינה ציון: כפי שמאמר 11 מסביר (B.9§), אין לחבר תוצאות קשורות זו בזו כאילו היו ניסויים בלתי תלויים, ואת הטבלה קוראים שורה אחר שורה, לפי המבחן של כל שורה.

D.2 מה הסדרה מדדה בעצמה

השורות הירוקות שלמעלה הן, ברובן, מדידות שהסדרה ערכה בתסריטים שלה על נתונים ציבוריים, ולא תוצאות שנשאלו מן הספרות. יש לכך חשיבות לאמון של הקורא במודל חדש: תיאור שרק אוסף ממצאים שפורסמו ומסכימים איתו מוכיח מעט; תיאור שמנסח השערה, קובע סף, ואז מריץ את הספירה בעצמו מעמיד את ההשערה במבחן של ממש — וכאן הוא עשה זאת. הרשימה שלהלן מציינת מה נמדד ועל אילו נתונים. כל השוואה נעשתה בין שווה לשווה — אותה קרקע הוסרה משני הצדדים, אותם תחומי גודל, אותם קווי רוחב — וכל מאמר אומר זאת במחקר שלו.

מערך נתונים	מה הסדרה מדדה עליו	מאמרים
קטלוג המכתשים של Robbins [14]	צפיפויות מכתשים לפי אזור, קו אורך, קו רוחב וגודל; מבחן המכתשים העתיקים ביותר T2 (6,973 מכתשים של $Q \geq 20$); הצפיפות בקטבים; רצפות הימות; מחסור המכתשים של SPA	11, 8, 7, 6, 5
קטלוג המכתשים של Wang ועמיתיו [15]	יחס עומק לקוטר, גובה השפה ומצב המכתש; המכתשים המותכים	7, 6
מסד המכתשים של LPI; רשימות של מכתשים צעירים ומכתשים בעלי קרניים [17, 16]	האוכלוסייה הצעירה של הקטבים (מבחן D.3)	7
הכבידה של GRAIL: שדה Bouguer והגרדיאנטים שלו [19, 18]	73 כיפות ההזנה; 34 הימות על הגרדיאנטים; מסקונים טבעתיים ולא טבעתיים; המסה הצפופה שמתחת למכתשים המותכים	11, 8, 6, 5

מודלי עובי הקרום של GRAIL [10]	הקפיצה של הקרום; הכיפות הקבורות; T1 ו-T5 על כל ארבעת המודלים; הטבעות של SPA; מאזן הקרום	11, 8, 5
הגבהים של LOLA ו-SELENE [20] (SLDEM2015)	מפלסי רצפות, שפות, צווארונים, פסגות מרכזיות וחספוס הרצפות; העומק של SPA	8, 6, 5
קווי המתאר של הימות של LROC [21]	הבזלת שהוסרה משני הצדדים בכל השוואת מכתשים	7, 6, 5
Kaguya Multiband Imager, FeO ו-TiO ₂ [22]	טבעות הברזל והטיטניום סביב הימות; הקרקע מסביב לכל מכתש ובתוכו	6, 5
התוריום של Lunar Prospector [23]	התוריום של המגע; התוריום של הימות לעומת הקרקע שלהם	8, 5
רשימת האגנים של GRAIL [24]	האגנים של 500 ק"מ ומעלה שהוסרו בספירות הקוטביות	7
טומוגרפיה של המעטפת התחתונה ביותר: מפות הצבעה, SMEAN, SMEAN2 [27, 26, 25]	בסיס האגס מעל ה-LLVP של האוקיינוס השקט	9, 3
הכבידה הימית של קרקעית האוקיינוס השקט [28]	הפסים, הכיפופים שלהם, קצה האגס והרכסים	9
אנליזות שפורסמו של Chang'e-6 ושל Apollo	הכימיה, הגילים, המתכת והמגנטיות של SPA; תקציב היסודות הסידרופיליים	8, 6, 5
המסלולים, הצורות והצפיפויות של Deimos ו-Phobos	מהירויות השיגור, הנטיות, עומק השקעים, מרכז המסה של Phobos	10

מערכי הנתונים שעליהם ערכה הסדרה את המדידות שלה, מה נמדד על כל אחד מהם, ובאילו מאמרים.

את הטבלה קוראים לפי הגוונים שלה. השורות בגוון כהה הן קטלוגי המכתשים ושדה הכבידה, שעליהם נשענות רוב השורות הירוקות; השורות בגוון אדמדם הן מפות פני השטח — קו המתאר של הבזלת והכימיה — ששימשו להסרת הימות משני הצדדים של כל השוואה ולמעקב אחר החומר שנזרק מהם; השורות הלבנות הן כדור הארץ ומאדים. המחקרים עצמם, בקצרה:

- **פני השטח של הירח, לפי אזור.** מבחני אזורי החשיפה T1, T2 ו-T5 (מאמר 11); הצפיפות בקטבים לפי גודל, קוטרי המכתשים, המכתשים הצעירים ושני הקטבים (מאמר 7); מחסור המכתשים, העומק, הטבעות והנקבוביות של South Pole–Aitken (מאמר 8, מחקרים 1–5).
- **הימות כפתחים.** הימות על הכיפות, הקפיצה של הקרום, הכיפות הקבורות, המרכזים השוקעים, הרצפות במפלס אחד, הרצפות הנקיות וסדר הקפיאה שלהן, טבעות הברזל והטיטניום, התוריום של המגע, הצווארון של הימות הרחוקים (מאמר 5, מחקרים 1–16).
- **המכתשים כנחיתות.** ספירה וצורה לפי קו אורך, מבחן המקור, הרצפות המותכות והמורמות, המסה שמתחת למכתשים המותכים, פנים המכתש, המסה הזרה והמפזר האחרון (מאמר 6, מחקרים 1–15).
- **כדור הארץ.** המיקום של בסיס האגס מול חמישה מודלים טומוגרפיים ושני מודלים ממוצעים (מאמר 3, E.4§); הגאומטריה של הפסים, של קצה האגס ושל הרכסים בשדה הכבידה הימי (מאמר 9).

התסריטים, הממוצעים לפי חגורה והקלטים מופקדים עם חבילת השחזור (ראו "זמינות הקוד").

חלק E — הדרישות ותצפיות המפתח

הבעיה והגישה

מה חייב להתקיים אם המודל נכון, ומה מראות תצפיות המפתח שלו? **התשובה:** כל שלב מנוסח כדרישה עם המבחן שלה, ושתי תצפיות המפתח של המודל נקראו מול הנתונים.

חלק D הראה מה נמדד. החלק הזה פונה אל מה שהמודל עדיין חייב לספק, ואל שתי תצפיות המפתח שלו. הדרישות הן אלה של מאמר 11, שמנסח כל אחת מהן עם המבחן שלה; כאן כל אחת מופיעה בשורה אחת, עם המעמד שלה, כדי שהקורא יוכל לראות את הרשימה כולה בבת אחת ולפנות אל מאמר 11 לשם הטיעון.

E.1 הדרישות

התנאים של התהליך. התהליך קביל בפיזיקה המקובלת רק אם מתקיימים התנאים הבאים. כל אחד מהם הוא תנאי שהמאמרים מחשבים ומנסחים יחד עם המבחן שלו. הטבלה נושאת את התנאים של המהדורה הראשונה של המאמר הזה; השורות שמאמרים מאוחרים יותר חידדו מובאות בצורתן הנוכחית.

תנאי	ערך	מאמר	מה בוחן אותו
גוף אם מהיר ומורחב, שהליבה שלו עדיין מתכנסת	5.5 שעות (חלון של -4.90 5.54 שעות); התפשטות של 98 ק"מ לפחות; $k \gtrsim 0.397$ בתחילת ההעברה	2	הסיבוב של כדור הארץ הקדום לפני שהירח נוצר, בתוך החלון
התכה עמוקה קלה	מתחת לכ-3,864 ק"ג/מ"ק לאורך העלייה	3	דרך נדיפה ששומרת את ההתכה העמוקה קלה בלחצים של המעטפת התחתונה
חיבור רחב, מסיבי וצמיג	מעבר שרדיוסו כ-1,000 ק"מ לפחות (0.46 מסות ירח); מגע של 6,000 ק"מ, 3,000 ק"מ בשחרור; שכבה שזורמת ואינה נשברת	3	חיבור שזורם ואינו נשבר, ונושא את הגוף אל מעבר לקורוציה
שחרור מעבר לקורוציה	מרווח של כ-210 ק"מ: $d_0 \approx 105, \Delta r \simeq 2d_0$ (מאמר 3, C.5a§)	2, 3	מצב השחרור, מעבר לקו הקורוציה
גוף קשיח ועגול בשחרור	$\mu \geq 10$ ג'יגה-פסקל, יחס צירים ≤ 1.04 ; 16,400 ק"מ נמצאים בתוך גבול רוח הנוזלי לצפיפות 2,600 ק"ג/מ"ק (19,971 ק"מ) ומעבר לגבול הקשיח (10,314 ק"מ)	2, 4, 7	גוף קשיח בשחרור

קליפה נוקשה	צמיגות פני השטח $\geq 10^{23}$ פסקל-שנייה במהלך העלייה	7, 6, 3	קרום שהחזיק את המכתשים שלו לאורך העלייה; קרום בצד הרחוק עבה מזה של הצד הקרוב
קו רוחב של שחרור	22.5°, קו הרוחב של מרכז המגע והחסם העליון של קו הרוחב של השחרור ושל i_0 (25° נשמר כמקרה רגילות)	4	אזור מקור שמוצב בקו רוחב שנותן כ-5° היום

התנאים של התהליך: הערך של כל תנאי, המאמר שמחשב אותו, ומה שבוחן אותו.

שתי שורות השתנו מאז המהדורה הראשונה, ושני השינויים חידדו את התנאי ולא ריככו אותו. החיבור הוגבל בתחילה ברדיוס של יותר מ-854 ק"מ; המבחן המשותף של מאמר 3 (A.13§) מציב כעת את הסף במעבר של כ-1,000 ק"מ, שכבר מחזיק חצי ירח במסה, ולכן החיבור הוא הבסיס הרחב של הכיפה. שורת ההישרדות דרשה בתחילה צמיגות פנימית מסדר גודל של 10^{18} – 10^{20} פסקל-שנייה למשך הזמן שבתוך גבול רוח הנוזלי; כעת היא דורשת גוף קשיח ועגול בשחרור, משום שהפחיסות וההתעגלות התרחשו בעוד הירח מחובר (מאמר 7), ומה שעזב את הקו היה גוף בעל קליפה קשיחה (מאמר 2, B.7§). קו הרוחב של השחרור, שהיה בתחילה כ-25°, הוא כעת 22.5° של מרכז המגע.

שמונה-עשרה הדרישות. מאמר 11 מרכז את מה שירח שנבנה בדרך הזאת חייב להראות בשמונה-עשרה דרישות: שבע התכונות הקלסיות של הירח (R1–R7), אזורי החשיפה (R8), שבע הדרישות שנובעות מן האגס (R9–R15) ושלוש שנוספו בעקבות המאמרים שנסגרו אחריו (R16–R18). כל שורה שלהלן מציינת את הדרישה, את המספר המרכזי שלה ואת מצבה. הצבע הולך לפי השיטה של חלק D.

הדרישה, בשורה אחת	מספר מרכזי	מעמד
R1 הירח עשוי מחומר ארצי, בכמה מערכות איזוטופיות בבת אחת	חמצן: 1 ± 5 ppm בין כדור הארץ לירח	נתמכת
R2 מעט מתכת: ליבה קטנה של ברזל ארצי; רוב חומר הליבה שנכנס לאגס ירד בחזרה לאורכו אל כדור הארץ	ליבה של 1–2% מן המסה (סייסמית כ-1.4%)	נתמכת
R3 קרום עבה יותר בצד שרחוק מן המגע	הצד הרחוק עבה יותר בכ-8–10 ק"מ; הקליפה 2.85 לעומת הקרום 2.6×10^{21} ק"ג	נתמכת
R4 פנים אחד לעבר כדור הארץ, שנשמר מן השלב המחובר	הסנכרון של היום	נתמכת
R5 סדר סגירה מוגדר: הצד הרחוק נסגר ונשמר לפני שהצד המזון נרגע	יחידות ברות השוואה בשני הצדדים	נתמכת

נתמכת	חומרים נדיפים בכמות ובמצב שההזנה צריכה	R6
נתמכת	מרכז המסה מוסט לעבר כדור הארץ, על ידי אותו קרום	R7
עברה בחלקה	שלושה אזורי חשיפה סביב מרכז הצד הקרוב	R8
ממתינה	אגס שהוא חלק מכדור הארץ ומוחזק בכבידה של כדור הארץ, בתוך הקו	R9
ממתינה	האגס נאסף בחזרה בשלמותו אל כדור הארץ; דבר אינו נשאר במסלול	R10
המיקום עבר	בסיס האגס מעל ה-LLVP של האוקיינוס השקט	R11
ממתינה	התוריום של המגע, שהגיע ממעמקי כדור הארץ	R12
ממתינה	הליבה כמדד לעומק שאליו הגיעה ההזנה	R13
ממתינה	מעט חומר זר או בכלל לא, בירח ובפלומות של האוקיינוס השקט	R14
עברה	הצפיפות בקטבים עולה עם גודל המכתש	R15
עברה	34 הימות הם הפתחים; מכתשים שנחתו על רצפות פעילות הותכו	R16
עברה	שתי יציאות, Imbrium ו-Serenitatis, וכיפה מדרום לשתייהן	R17
ממתינה	על מאדים, שני הירחים נורו מצינור משווני אחד	R18

שמונה-עשרה הדרישות של מאמר 11, כל אחת בשורה אחת, עם המספר המרכזי שלה ומעמדה. הצבעים לפי השיטה של חלק D.

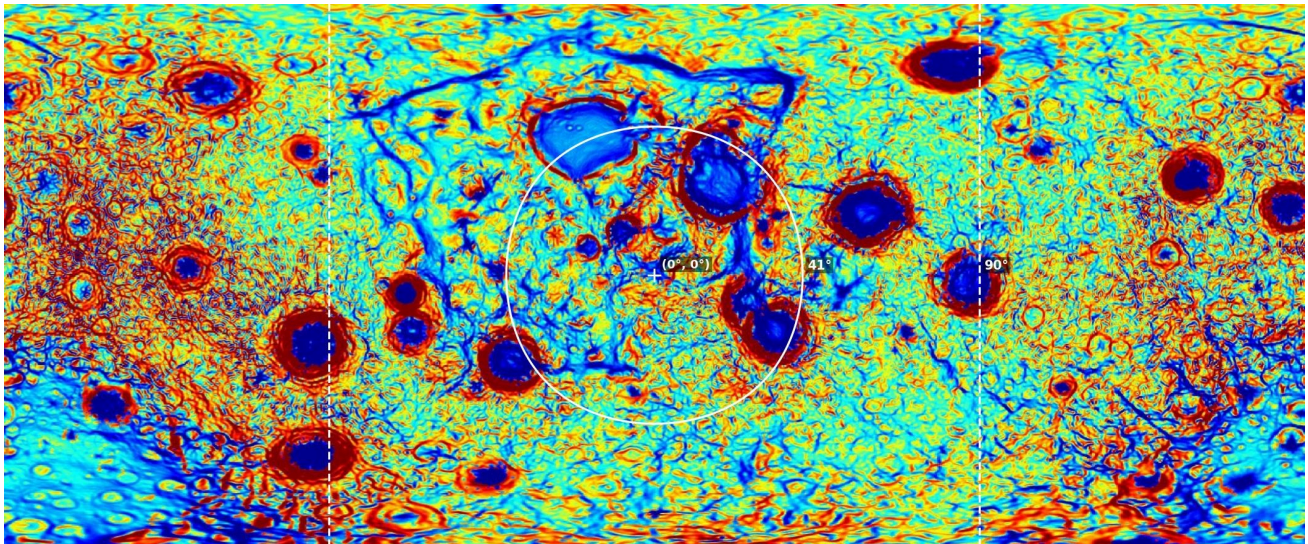
את הטבלה קוראים מלמעלה למטה כהיסטוריה של בחינת המודל. לכל אחת משבע השורות הראשונות יש תמיכה תצפיתית, ולכל אחת חסר חישוב אחד שיהפוך התאמה למבחן — מאזן איזוטופי רב-מערכתי, מודל

הסעה של המתכת, מודל צפיפות משותף לקרום ולמרכז המסה. R8 היא הדרישה היחידה של המהדורה הראשונה שהורצה כמבחן סטטיסטי שהספים שלו נקבעו מראש, והיא תצפית המפתח הראשונה של המודל (E.2). מתוך עשר הדרישות שנוספו מאוחר יותר, שלוש כבר עברו על מדידות של מאמרים 6, 7 ו-8, והשאר עומדות עם המבחן שיכריע בהן. את השורות אין מחברים: R3 ו-R7 הן שתי נקודות מבט על התפלגות אחת של הקרום, והימות הם נקודת מבט שלישית; לספור אותן כשלוש הצלחות פירושו לשקול חבילה אחת על שלושה מאזניים (מאמר 11, B.9§).

E.2 שתי תצפיות המפתח

תצפית המפתח הראשונה: אזורי החשיפה. אם הירח התעגל על קצה האגס — כדור שנמעך על הקצה, והמגע שלו הצטמצם מ-6,000 ק"מ ל-3,000 ק"מ לפני הניתוק — פני השטח של הירח נושאים את רצף החשיפה של ההתקלפות הזאת כשלושה אזורים קונצנטריים סביב מרכז הצד הקרוב. המגע, במרכז, נחשף אחרון, בשחרור; טבעת הבסיס, בשוליים, נחשפה כשהמגע הצטמצם במהלך ההתעגלות, כמו כוס יניקה שמקלפים מזכוכית ומשתחררת קודם בשוליה; פני הכיפה, בצד הרחוק, נחשפו ראשונים. כלל החלק היחסי של מאמר 3 מציב את הגבולות: כיפת מגע של כ-31° סביב מרכז המגע — קצה האגס, בערך ב-22°–24° צפון; האזורים מחושבים סביב 24.1° צפון, 335.2° מזרח, מרכז המגע כפי שהמחבר שרטט אותו, 34.0° מן הנקודה התת-ארצית — הנקודה שפונה ישירות אל כדור הארץ, חגורה עד 70°, והצד הרחוק מעבר לה; המבחנים של ספטמבר 2026 השתמשו בגבולות המוקדמים, 41° ו-90° סביב הנקודה התת-ארצית (מאמר 11, B.8§). לכן שלושה דברים חייבים להסתדר לפי המרחק הזוויתי ממרכז הצד הקרוב, ולפי שום ציר אחר: עובי הקרום, משום שהצד הרחוק בנוי משכבות רבות של סיאל דחוס שנדד במעלה האגס אל קצהו, ומחומר שחזר אליו שוב ושוב; אוכלוסיית המכתשים העתיקה ביותר, שנישאה למעלה על הקליפה והיא הצפופה ביותר במקום שבו הקליפה הייתה חשופה הכי הרבה זמן; ואופי האגנים — אילו פלטו חומר ואילו רק העבירו אותו. שום ירח שהורכב מחלקים אינו צופה סידור קונצנטרי סביב מרכז הצד הקרוב.

המבחנים מנוסחים כמספרים שנקבעו לפני הספירה (מאמר 11, B.8§): הקרום מתעבה באופן מונוטוני מדיסקת המגע דרך חגורת השוליים אל הצד הרחוק; אוכלוסיית המכתשים העתיקה ביותר של הצד הרחוק צפופה מזו של חגורת השוליים פי 1.1 לפחות; אגני המסקון הטבעתיים מרוכזים בחגורת השוליים (40% מהם לפחות ב-41°–105°); ואין ציר ביקורת שמסדר את הנתונים טוב כמו הציר הפונה אל כדור הארץ. יחד הם קוראים את התקלפות הגוף מקצה האגס בשלב 4, ההתעגלות — הגאומטריה שעליה נשען המבנה כולו.



איור E.1. שלושת אזורי החשיפה על מפת הגרדיאנטים של Bouguer של GRAIL. מעגלים ב-41° (קו רציף) וב-90° (קו מקווקו) מן הנקודה התת-ארצית (0°, 0°) מסמנים את דיסקת המגע, את חגורת השוליים ואת הצד הרחוק כפי ששימשו במבחני ספטמבר (מאמר 3, B.4§; הגבולות הנוכחיים במאמר 11, B.8§). כחול: ריכוזי מסה מתחת לקרום דק; אדום: השוליים שלהם. המסקונים הלא טבעתיים החזקים ביותר נמצאים בתוך הדיסקה, האגנים הטבעתיים בחגורה, והאגנים שעל קרום עבה — מעבר לה (מאמר 11, B.8§, מבחנים T1–T5). היטל גלילי שמרכזו ב-0° מזרח, קווי רוחב $\pm 75^\circ$. קרדיט: NASA/GSFC/Arizona) LROC QuickMap (State University); גרדיאנטים של כבידת Bouguer של GRAIL (NASA/JPL-Caltech/MIT).

את האיור קוראים מן המרכז החוצה. בתוך המעגל הרציף נמצאים המסקונים החזקים ללא טבעות — Imbrium, Procellarum, Serenitatis; בין המעגלים נמצאים האגנים הטבעתיים — Humor, Crisium, Orientale; מעבר למעגל המקווקו נמצאים אגנים על קרום עבה וגבוה, ללא אף אחד מן השניים. זה הרצף שהכיפה צופה. אבל המפה לבדה היא קריאה, לא מבחן; המבחן הוא הסטטיסטיקה של החגורות.

התוצאה. כשהמבחן הורץ על ארבעת מודלי עובי הקרום של GRAIL ועל קטלוג המכתשים של Robbins בספטמבר 2026 (מאמר 11, B.8§), הסידור נמצא. הקרום מתעבה מדיסקת המגע אל חגורת השוליים ואל הצד הרחוק בכל מודל, בסדר עולה על פני שתיים-עשרה חגורות של 15° סביב הציר החזוי (+0.87 בכל מודל; במודל 1 מונוטוני על פני עשר חגורות רצופות), ולא סביב שום ציר ביקורת (הקטבים -0.43 ו-+0.43, השוליים המזרחיים +0.76). המכתשים העתיקים ביותר מסתדרים כפי שנחזה: רחוק/שוליים 1.34, רחוק/דיסקה 2.21, שוליים/דיסקה 1.65, כל אחד מעל קו המעבר שלו. ניגוד העובי, הצד הרחוק פחות דיסקת המגע, הוא 10.0, 9.65, 10.3 ו-10.6 ק"מ במודלים 1–4, והסידור מתקיים בכל הארבעה; גודל הניגוד הוא מספר שיש לכייל. בחישוב מחדש על הגאומטריה הנוכחית (כיפת מגע 0°–31°, חגורה 31°–70°, חלק רחוק 70°–180°) הסידור מתקיים בשני הגדלים: מכתשים של ≥ 20 ק"מ, בלי הימות וכלי 53 — SPA, 187 ו-220 קמ"ר (רחוק/חגורה 1.17, רחוק/כיפה 4.15, חגורה/כיפה 3.55); קרום מודל 1, עם הימות — 26.3 ו-30.3 ק"מ, הרחוק פחות הכיפה 9.9 ק"מ. מבחן הסידור עבר אפוא על המכתשים ועל הציר; לגבי העובי, הסידור קיים בכל מודל, וגודל הניגוד, כ-10 ק"מ, נשאר לכיול. T3 ו-T4, סוגי האגנים, טרם הורצו.

תצפית המפתח השנייה: החומר של המכתשים. במודל, כמעט כל המכתשים של הירח, כ-99%, עשויים מחומר ארצי שחזר (מאמר 6); חומר זר, אם יימצא בכלל, יימצא בכמויות קטנות, ואבק חלל דק אינו נמנה. המכתשים מתעדים את החומר שעזב את כדור הארץ וחזר, ולא הפצצה מבחוץ. המספר שמודד זאת הוא המסה הזרה. **התוצאה:** אם קוראים אותם כפגיעות, המכתשים הנראים דורשים 4.4×10^{19} –5.0 ק"ג של חומר זר, 2%–6% מ-5 הק"מ העליונים של הקרום, ואילו הקרום מחזיק 0.9%–2% לכל היותר, והרותניום של התכות המכתשים ארצי (מאמר 6, מחקר 8).

E.3 מעמד המודל

מודל LEF הוא מודל של תהליך. הוא מציע רצף, מחשב כל צעד, ומנסח את המבחן של כל צעד. הוא אינו מציג הדמיה של העלייה: היציבות התלת-ממדית של הגוף המחובר, האנרגיה שמניעה את הזרימה כלפי מעלה, משוואת המצב העמוקה של ההתכה והזמן שבו המגע כושל הם החישובים שהוא דורש ועדיין לא ביצע (מאמר 3, D.4§). המודל טוען שהירח נוצר בדרך הזאת. לתמיכה בכך הוא מראה היכן טעתה ההתנגדות הקלסית לפיצול: היא חישה את השחרור על פני כדור הארץ, ושם הוא היה דורש מהירויות עצומות שהיו מפרקות את כדור הארץ. עם האגס, האגס מרים את עצמו אל אזור הקורוטציה ומשחרר את החומר שבקצהו — במקרה שלנו, את הירח; האגס גדל עד שהחומר שבקצהו מתנתק, ואז המיון מושך את האגס בחזרה פנימה. ההתנגדות הקלסית חישה על פני כדור הארץ; המודל מחשב בקצה האגס. עוד הוא מראה שהדרך פתוחה ברדיוס הקורוטציה, עם תקציב תנע זוויתי של פי 1.007 מזה של היום; שלחצי כדור בגודל הנכון יש הצפיפות הנכונה ושטח הפנים הנכון ללא כונון; שאותו תהליך על מאדים נותן את מה שיש למאדים; שפני השטח של הירח נושאים את הסידור שהתהליך משאיר, על הציר שהוא חוזה; ושהימות, המכתשים, הקטבים ו-South Pole–Aitken עוברים כל אחד את המבחנים שהמאמרים שלהם קבעו להם — 58 שורות ירוקות ואף לא אחת אדומה.

הוא אינו טוען להוכחה. רוב הדרישות הן כעת יעדים לכיול יותר מאשר שאלות פתוחות — המספרים קבועים, המבחנים כתובים, והנתונים קיימים או בדרך. במובן הזה הסדרה היא אבן דרך: כל דרישה עומדת עם המבחן שלה, שורה אחר שורה, וסעיף E.2 מציג את שתי תצפיות המפתח עם תוצאותיהן; הדרישות והמבחנים שלהן מוצגים במלואם במאמר 11.

חלק F — הסדרה

הבעיה והגישה

שנים-עשר מאמרים נושאים מודל אחד. כיצד הם מחולקים, על מה עונה כל אחד, ומה נשאר? **הגישה:** טבלה אחת של המאמרים, עם השאלה והמספר של כל אחד; ואחריה העבודה הפתוחה, מנוסחת כחישובים שעוד צריך לעשות וכנושאים שהמודל פותח בפני אחרים.

F.1 שנים-עשר המאמרים

המאמרים נכתבו כדי שיקראו אותם לפי הסדר, אבל כל אחד עומד בפני עצמו; כל אחד נושא את טבלת הסביבה, את התחזיות שלו ואת המבחנים שלו. הטבלה נותנת לכל מאמר את השאלה שלו ואת המספר שנושא את התשובה שלו. הגוונים הולכים לפי החלוקה של הסדרה: כחול כהה למאמרים שמנסחים את המודל ובונים ומשחררים את הגוף (1–4), אדום למאמרים שקוראים את פני השטח של הירח (5–8), לבן למאמרים שבוחנים את המודל מחוץ לירח ומרכזים את דרישותיו (9–11), וקדם לנושאי המחקר.

מס'	כותרת	השאלה שהוא עונה עליה	המספר המרכזי שלו
1	המודל (The Model)	מהו התהליך כולו, מכדור הארץ החם ועד הירח של היום?	שחרור ב-16,399 ק"מ, לפני 3.873 מיליארד שנה
2	מנגנון LEF בעיקרון	האם הירח יכול לעזוב את כדור הארץ במהירות מסלולית בלי שייזרק, והאם התנע הזוויתי נסגר?	16,399 ק"מ ביום של 5.77 שעות; תקציב של 1,007, לעומת 2.74 בדרך הקלסית
3	מנגנון LEF בפועל	כיצד נבנה הגוף — מוזן מבפנים, עולה מבחוץ — וכיצד השתחרר?	150 ג'יגה-פסקל במקור; 1,300 ק"ג/מ"ק על קצה האגס
4	המסלול	מאין באה הנטייה, והאם הירח מתרחק כבר מן ההתחלה?	$i_0 = 22.5^\circ \rightarrow 5.145^\circ$ היום
5	הימות	מהו ים?	33 מתוך 34 על כיפת הזנה; 44 מתוך 73 כיפות קבורות
6	המכתשים	מה יצר את המכתשים, ומה הם מתעדים?	כ-99% מחומר חוזר; -249 252 לעומת 139–175 ל- 10^6 קמ"ר
7	הקטבים	מדוע הקטבים צפופים במכתשים?	1.20 ± 0.05 , עולה מ-1.09 ל-1.53 עם הגודל
8	South Pole–Aitken	מהו האגן הגדול של הצד הרחוק?	מחסור מרכזי של 0.51; המודל מתאים ל-16 מתוך 17 אנומליות

9	הפסים	לאן הלך האגס, והיכן ישב הירח?	פסים של 9,360 ק"מ לעומת אגס של 9,680–9,800; קצה האגס 3,360 ק"מ
10	מאדים	האם כוכב לכת צעיר ומהיר יכול לירות את הירחים שלו?	דחיפת גז של 2.4–2.9 ק"מ/ש'; טבעת משלימה את המסלול; Phobos נלכד בידי הקו ליד 19,000 ק"מ
11	הדרישות	כיצד חייב להיראות ירח שנבנה בדרך הזאת, והאם הוא נראה כך?	18 דרישות; T2, 0.87+ T5 1.34
12	נושאי מחקר (Research topics)	מה צריך למדוד ולחשב בהמשך?	העבודה הפתוחה של F.2–F.3

שנים-עשר המאמרים של הסדרה: השאלה שכל אחד עונה עליה והמספר שנושא את התשובה.

כשקוראים את העמודה השלישית מלמעלה למטה, השאלות הולכות אחרי התהליך עצמו: כיצד הירח יכול היה לעזוב (2), כיצד הוא נבנה (3), כיצד הוא הלך (4), מה הוא נושא על פני השטח שלו (5–8), מה כדור הארץ שמר (9), האם אותו דבר קרה במקום אחר (10), ומה השלם חייב לקיים (11).

F.2 מה נשאר פתוח — עבודה עתידית

שני נושאים נמצאים מחוץ לסדרה ונשארים, במכוון, לעבודה עתידית.

מערכת הצירים. הצירים של כדור הארץ ושל הירח, מן השחרור ועד היום, אינם נפתרים בסדרה הזאת. מעורבים בהם ארבעה מישורים — המשוואה של כדור הארץ, מסלול הירח, המשוואה של הירח והמילקה; הצירים נעים בשתי דרכים שונות ובקצבים שונים מאוד; הזיכרון של בליטה קפואה אינו ידוע; והחלקים משפיעים זה על זה במשוב הדדי. לכן הסדרה נותנת כל מיקום במסגרת של היום, ואומרת זאת במקום שבו כיוון בעבר חשוב: 22.5° של השחרור, המשוואה של הפסים שנטוי ב- 10° לפחות למשוואה של היום, הכיוון הדרומי של הכיפה של South Pole–Aitken. שינוי בציר של כדור הארץ אחרי הניתוק עשוי לגרום ל-SPA להיראות כאילו אינו מיושר עם הברנר; פתרון הצירים עשוי לשנות חלקים במודל, ומשום כך הוא מופיע כאן ראשון.

המגנטיות של הירח. מאין באה המגנטיות הקדומה של הירח — הנושא אינו נדון בסדרה. הדפוס שלה מעל South Pole–Aitken — מחוק במרכז, חזק בצד הנגרר, המערבולות (swirls) של Ingenii — נקרא כתיעוד של חום ושל ברזל מפנים כדור הארץ; המקור של השדה עצמו הוא עבודה עתידית.

החישובים הפתוחים. בתוך הסדרה, כל מאמר מציין את החישובים שהוא דורש ועדיין לא עשה. הם מרוכזים בטבלה, כל אחד עם מה שהוא יסגור. אף אחד מהם אינו משנה מספר במאמרים; כל אחד הופך דרישה לתוצאה.

חישוב	מצוין במאמר	מה הוא יסגור
הדמיה נומרית של העלייה	3	גוף במסת הירח, מוקצף ל-1,300 ק"ג/מ"ק, שמוזן בלחץ דרך בסיס של 6,000 ק"מ על גוף אם מסתובב ומורחב: המבחן התלת-ממדי הראשון של המנגנון. המצב ההתחלתי מוגדר במלואו בסדרה

משוואת המצב של התכה עשירה בנדיפים ב-50–150 ג'יגה-פסקל	3, 10	האם ההזנה עוברת מתחת ל-3,864 ק"ג/מ"ק (ניסויי הולם וניסויים בתא סדן יהלום על התכות מימיות ופחמניות)
מאזן האנרגיה וזמן הכשל של המגע	3	העבודה של ההרמה והרגע שבו השכבה הצמיגה משתחררת
בעיית Maclaurin המרובדת	2	גוף אם של Clairaut–Darwin–Radau עם ברזל יורד: רדיוס הקורוטציה בתחום 15,382–17,569 ק"מ (מ- $D = 1$ עד $D = 3$), ומסלול ההתחלה של מאמר 4
האינטגרציה התרמית-מסלולית	4	אין Q קבוע שמתאים גם להתרחקות של היום וגם לגיל; כשמעברי Laplace ו-Cassini נפתרים, $i = \lambda$ הופך לתחזית של 5.145°
הלחץ הכלוא בניתוק	7	חלקו במהירות ההתחלתית של הירח, והאם מהירות השחרור של מאמר 4 דורשת תיקון
ההיסטוריה של מאגר Hf–W	11	כרונולוגיה אחת לחתימות, להעברת המתכת ולתנע הזוויתי לאורך חלון של 600 מיליון שנה
הסעת המתכת ומודל צפיפות משותף	11	R2 ו-R13 (חלק הליבה); R3 ו-R7 יחד (העובי ומרכז המסה)
הצורה עם חוזק והרפיה בשתי שכבות	7	הצפיפות בקטבים מקליפה נוקשה מעל גוף רך יותר; המאמץ בקליפה
הגאות על גוף שמוחזק בבסיסו	7	הסדר של שישה צירים כמספר; הכתר של הצד הרחוק; המכתשים הגדולים ביותר (1.84)
המנוע של הפתחים	5, 7	השטף הקריטי וזמן האיטום של כל ים; תפוקת המכתשים מן הפתחים שסביב 90° מזרח
ציר החום, האנרגיה שלו ומאזן החמצון-חיזור שלו	8	האם החום של הברנר דוחס את העמוד, סוגר את הנקבוביות ומוחק את המכתשים של SPA; המבחנים הדינמיים מחושבים מחדש ב-5.77 שעות
דחיפת הגז בצינור, והטבעת	10	השלב הקריטי בסיפור של מאדים: פקק רך שגז כלוא דוחף לאורך 200–300 ק"מ; הטבעת שמשלימה את המסלולים

החישובים הפתוחים של הסדרה: המאמר שמציין כל חישוב, ומה החישוב יסגור.

מודל של תהליך מצדיק את מקומו בעבודה שהוא מאפשר. הנושאים שלהלן נובעים ישירות מן הרצף של המודל; כל אחד מהם הוא מדידה או מחקר שיקדמו שלב, וכל אחד מנוסח יחד עם התוצאה שהוא מצפה לה. הם מרוכזים במאמר 12, נושאי מחקר (Research topics) — מאמר נלווה שעומד מחוץ למאמרי המודל עצמו: הוא אינו מוסיף שלב לתהליך, אלא אוסף מכל המאמרים וממחברות העבודה של הסדרה 118 נושאים שהמודל פותח לחוקרים אחרים, כל אחד עם השאלה, תחזית המודל, הנתונים והשיטה.

1. **הסטטיסטיקה של החגורות, בשלמותה (R8).** סוגי האגנים T3 ו-T4, ו-T2 על אוכלוסיית מכתשים שנבחרה לפי גיל: הציר, החגורות והספים קבועים (מאמר 11, B.8§); LOLA, GRAIL וקטלוגי המכתשים מספיקים.
2. **הדגימות של MMX.** חומר מ-Phobos יחזור ב-2031. איזוטופים של מאדים בלי רכיב של גוף פוגע, בועות סגורות של קצף שהתקרר, ומרכז מסה שמוסט לעבר מאדים, לעבר הקצה הקהה, הן התוצאות שמאמר מאדים צופה (מאמר 10, חלק III; לוח הזמנים של המשימה [29]). את העובדה שבורות לעולם אינם חוצים חריצים אפשר לבדוק כבר עכשיו, על תמונות קיימות.
3. **קרום הצד הרחוק כסיאל של כדור הארץ.** אם קרום הצד הרחוק בנוי משכבות רבות של סיל ארצי דחוס שנדד אל קצה האגס, ומחומר שחזר אליו שוב ושוב, ההרכב הכולל שלו צריך להיות סיאלי במובן של פני השטח של כדור הארץ הקדום, הוא צריך להיות צפוף יותר ועשיר יותר בברזל ככל שמעמיקים (פסגות מרכזיות לעומת עומק המוצא, מאמר 3), וייתכן שהוא מגיע עמוק יותר ממה שמודלי הקרום מניחים היום. החומר של Chang'e-6 ודגימות עתידיות מן הצד הרחוק בוחנים את הראשון; פסגות מרכזיות מעומקי מוצא שונים בוחנות את השני.
4. **המתכת של הנוריתים העתיקים.** איזוטופים של Os, Ru, Mo, Ti, Cr במתכת הברזל-ניקל של שני הנוריתים המתוארכים של Chang'e-6, ואיזוטופים של Os ו-Ru בהתכות של כל אגן של הימות: המודל צופה שהמתכת הזאת ארצית. חומר זר, אם ימצא בכלל, צריך להימצא בכמויות זעירות — אבק חלל, מטאוריט אחד או שניים שנחתו במשך ארבעה מיליארד שנה (E.2; מאמרים 5, 8).
5. **המעטפת התחתונה של האוקיינוס השקט.** המיקום של הבסיס מעל ה-LLVP של האוקיינוס השקט עבר; נותרו ההרכב שלו, הצורה שלו לעומת ה-LLVP האפריקני, והאיזוטופים של הפלומות שעולות ממנו. אנו מציעים — בהסתעפות, משום שטבעם של האזורים העמוקים עדיין פתוח (ייתכן שה-LLVP של האוקיינוס השקט הוא חומר הקשור לליבה שלא סיים להתמיין) — שה-LLVP של האוקיינוס השקט הוא ברובו האגס שחזר, חלק מן החומר הממוין שחזר אל תוך כדור הארץ; המודל צופה שהוא צפוף יותר ועשיר יותר בברזל מן האפריקני (מאמר 3, חלק E).
6. **הפסים.** תשעת המחקרים של מאמר 9, חלק G: המשווה מותאם מחדש על עקבות מלאים, מבחן המקרה של הבסיס עליו, הסדר החד-צדדי של הפסים, המדרגות בעומק ובגיל, הצד הנגרר, הרציפות מתחת לרכסים, רכסי השפכטל מול עקבות פלומות, טביעת הראי בקנה מידה 1.37, וחתכים סייסמיים לרוחב הקיפול שמתחת לשכבות המתוארכות.
7. **המכתשים הצעירים של הקטבים.** מדגם מתוארך של כ-150 מכתשים צעירים בכיפות הקוטביות יכריע את מבחן D.3 של מאמר 7; המודל צופה שלא יופיע בו עודף, משום שהמכתשים הצעירים נוצרו על הגוף העגול.
8. **הימות ברזולוציה גבוהה יותר.** מפת התוריום ב-26 ק"מ מעל כיפות ההזנה; הבזלת הצעירה ביותר של כל ים לעומת מרכז המגע — היא צריכה להיות צעירה יותר ככל שמתקרבים אליו, אם ימות המגע נאטמו אחרונים (מאמר 5).
9. **הגופים האחרים.** התהליך, כשמריצים אותו על נוגה (סיבוב אחד ב-243 יום) ועל כוכב חמה (59 יום), אינו מרים דבר; על כדור ארץ-על שמסתובב מהר הוא מרים יותר. מחקר פרמטרים בסיבוב, במסה ובתכולת הנדיפים יהפוך את טיעון המשפחה של מאמר 10 לתחזית לגבי הירחים של כוכבי לכת אחרים.

אף אחד מאלה אינו אקזוטי; כל אחד הוא חישוב או מדידה שבהישג ידה של קבוצה קיימת, וכל אחד יחזק שלב של התהליך או יסיר אותו.

זמינות הקוד

מאמר 1 אינו מחשב דבר חדש: כל מספר בו לקוח ממאמרים 2–11, וכל אחד משוחזר על ידי התסריטים של חבילת השחזור של LEF (Python 3, numpy, scipy), שמדפיסים את הערכים של כל סעיף מתוך הקלטים המוצהרים בטקסט, יחד עם הספירות, הממוצעים לפי חגורה ובחירות הקטלוג שמאחורי הרמזור של חלק D. החבילה מצורפת לפרה-פרינט הזה כחומר משלים (LEF_code_and_data.zip). גרסה מוקדמת של הסדרה ושל החבילה מופקדת ב-doi:10.5281/zenodo.22743615.

- Ribas, I., Guinan, E. F., Güdel, M., & Audard, M. (2005). Evolution of the solar activity over time [1] • and effects on planetary atmospheres. I. High-energy irradiances (1–1700 Å). *The Astrophysical Journal*, 622, 680–694
- Young, E. D., Kohl, I. E., Warren, P. H., Rubie, D. C., Jacobson, S. A., & Morbidelli, A. (2016). [2] • Oxygen isotopic evidence for vigorous mixing during the Moon-forming giant impact. *Science*, 351, 493–496
- Lock, S. J., Stewart, S. T., Petaev, M. I., Leinhardt, Z. M., Mace, M. T., Jacobsen, S. B., & Ćuk, [3] • M. (2018). The origin of the Moon within a terrestrial synestia. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 123, 910–951
- Ćuk, M., & Stewart, S. T. (2012). Making the Moon from a fast-spinning Earth: a giant impact [4] • followed by resonant despinning. *Science*, 338, 1047–1052
- Pahlevan, K., & Morbidelli, A. (2015). Collisionless encounters and the origin of the lunar [5] • inclination. *Nature*, 527, 492–494
- Jutzi, M., & Asphaug, E. (2011). Forming the lunar farside highlands by accretion of a [6] • companion moon. *Nature*, 476, 69–72
- Hartmann, W. K., & Davis, D. R. (1975). Satellite-sized planetesimals and lunar origin. *Icarus*, [7] • 24, 504–515
- Zhang, J., Dauphas, N., Davis, A. M., Leya, I., & Fedkin, A. (2012). The proto-Earth as a [8] • significant source of lunar material. *Nature Geoscience*, 5, 251–255
- Weber, R. C., Lin, P.-Y., Garnero, E. J., Williams, Q., & Lognonné, P. (2011). Seismic detection [9] • of the lunar core. *Science*, 331, 309–312
- Wieczorek, M. A., et al. (2013). The crust of the Moon as seen by GRAIL. *Science*, 339, 671– [10] • 675
- Hauri, E. H., Weinreich, T., Saal, A. E., Rutherford, M. C., & Van Orman, J. A. (2011). High pre- [11] • eruptive water contents preserved in lunar melt inclusions. *Science*, 333, 213–215
- Darwin, G. H. (1879). On the precession of a viscous spheroid, and on the remote history of [12] • the Earth. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 170, 447–538. See also Wise, D. U. (1963). An origin of the Moon by rotational fission during formation of the Earth's core. *Journal of Geophysical Research*, 68, 1547–1554
- Farhat, M., Auclair-Desrotour, P., Boué, G., & Laskar, J. (2022). The resonant tidal evolution of [13] • the Earth–Moon distance. *Astronomy & Astrophysics*, 665, L1
- Robbins, S. J. (2019). A new global database of lunar impact craters >1–2 km: 1. Crater [14] • locations and sizes, comparisons with published databases, and global analysis. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 124, 871–892. doi:10.1029/2018JE005592
- Wang, Y., Wu, B., Xue, H., Li, X., & Ma, J. (2021). An improved global catalog of lunar impact [15] • craters (≥1 km) with 3D morphometric information and updates on global crater analysis. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 126, e2020JE006728. doi:10.1029/2020JE006728

- Losiak, A., et al.; revised by T. Öhman (2015). *Lunar Impact Crater Database*, v08Sep2015. [16] •
 .Lunar and Planetary Institute
- Mazrouei, S., Ghent, R. R., Bottke, W. F., Parker, A. H., & Gernon, T. M. (2019). Earth and [17] •
 .Moon impact flux increased at the end of the Paleozoic. *Science*, 363, 253–257
- Lemoine, F. G., Goossens, S., Sabaka, T. J., et al. (2014). GRGM900C: a degree 900 lunar [18] •
 gravity model from GRAIL primary and extended mission data. *Geophysical Research Letters*, 41,
 .3382–3389. doi:10.1002/2014GL060027
- Goossens, S., Fernández Mora, Á., Heijkoop, E., & Sabaka, T. J. (2021). Patched local lunar [19] •
 gravity solutions using GRAIL data. *Earth and Space Science*, 8, e2021EA001695.
 .doi:10.1029/2021EA001695
- Barker, M. K., Mazarico, E., Neumann, G. A., Zuber, M. T., Haruyama, J., & Smith, D. E. [20] •
 (2016). A new lunar digital elevation model from the Lunar Orbiter Laser Altimeter and SELENE
 .Terrain Camera. *Icarus*, 273, 346–355. doi:10.1016/j.icarus.2015.07.039
- Nelson, D. M., Koeber, S. D., Daud, K., Robinson, M. S., Watters, T. R., Banks, M. E., & [21] •
 Williams, N. R. (2014). Mapping lunar maria extents and lobate scarps using LROC image
 .products. *45th Lunar and Planetary Science Conference*, abstract 2861
- Otake, H., Ohtake, M., & Hirata, N. (2012). Lunar iron and titanium abundance algorithms [22] •
 based on SELENE (Kaguya) Multiband Imager data. *43rd Lunar and Planetary Science
 .Conference*, abstract 1905
- Lawrence, D. J., Elphic, R. C., Feldman, W. C., Prettyman, T. H., Gasnault, O., & Maurice, S. [23] •
 (2003). Small-area thorium features on the lunar surface. *Journal of Geophysical Research:
 .Planets*, 108(E9), 5102. doi:10.1029/2003JE002050
- Neumann, G. A., Zuber, M. T., Wieczorek, M. A., et al. (2015). Lunar impact basins revealed [24] •
 by Gravity Recovery and Interior Laboratory measurements. *Science Advances*, 1, e1500852.
 .doi:10.1126/sciadv.1500852
- Cottaar, S., & Lekic, V. (2016). Morphology of seismically slow lower-mantle structures. [25] •
 .*Geophysical Journal International*, 207, 1122–1136. doi:10.1093/gji/ggw324
- Becker, T. W., & Boschi, L. (2002). A comparison of tomographic and geodynamic mantle [26] •
 models. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 3, 1003. doi:10.1029/2001GC000168.
 (SMEAN.)
- Jackson, M. G., Konter, J. G., & Becker, T. W. (2017). Primordial helium entrained by the [27] •
 hottest mantle plumes. *Nature*, 542, 340–343. doi:10.1038/nature21023. (SMEAN2.)
- Sandwell, D. T., Müller, R. D., Smith, W. H. F., Garcia, E., & Francis, R. (2014). New global [28] •
 marine gravity model from CryoSat-2 and Jason-1 reveals buried tectonic structure. *Science*, 346,
 .65–67
- JAXA. *Martian Moons eXploration — Mission Overview and Mission Schedule*. [29] •
 .<https://www.mmx.jaxa.jp/en/>. Checked 11 September 2026

הסדרה: Z. Duran. מאמרים 2–12 של הסדרה: (2026) *LEF Mechanism in Principle*; 3 *LEF Mechanism 2*; 4 *The Orbit*; 5 *The Maria*; 6 *The Craters*; 7 *The Poles*; 8 *South Pole–Aitken*; 9 *The Stripes*; 10 *Mars*; 11 *The Requirements*; 12 *Research topics*; 13 *The Stripes*; 14 *The Craters*; 15 *The Poles*; 16 *South Pole–Aitken*; 17 *The Maria*; 18 *The Orbit*; 19 *LEF Mechanism 2*; 20 *LEF Mechanism in Principle*; 21 *The Stripes*; 22 *The Craters*; 23 *The Poles*; 24 *South Pole–Aitken*; 25 *The Maria*; 26 *The Orbit*; 27 *LEF Mechanism 2*; 28 *LEF Mechanism in Principle*; 29 *The Stripes*; 30 *The Craters*; 31 *The Poles*; 32 *South Pole–Aitken*; 33 *The Maria*; 34 *The Orbit*; 35 *LEF Mechanism 2*; 36 *LEF Mechanism in Principle*; 37 *The Stripes*; 38 *The Craters*; 39 *The Poles*; 40 *South Pole–Aitken*; 41 *The Maria*; 42 *The Orbit*; 43 *LEF Mechanism 2*; 44 *LEF Mechanism in Principle*; 45 *The Stripes*; 46 *The Craters*; 47 *The Poles*; 48 *South Pole–Aitken*; 49 *The Maria*; 50 *The Orbit*; 51 *LEF Mechanism 2*; 52 *LEF Mechanism in Principle*; 53 *The Stripes*; 54 *The Craters*; 55 *The Poles*; 56 *South Pole–Aitken*; 57 *The Maria*; 58 *The Orbit*; 59 *LEF Mechanism 2*; 60 *LEF Mechanism in Principle*; 61 *The Stripes*; 62 *The Craters*; 63 *The Poles*; 64 *South Pole–Aitken*; 65 *The Maria*; 66 *The Orbit*; 67 *LEF Mechanism 2*; 68 *LEF Mechanism in Principle*; 69 *The Stripes*; 70 *The Craters*; 71 *The Poles*; 72 *South Pole–Aitken*; 73 *The Maria*; 74 *The Orbit*; 75 *LEF Mechanism 2*; 76 *LEF Mechanism in Principle*; 77 *The Stripes*; 78 *The Craters*; 79 *The Poles*; 80 *South Pole–Aitken*; 81 *The Maria*; 82 *The Orbit*; 83 *LEF Mechanism 2*; 84 *LEF Mechanism in Principle*; 85 *The Stripes*; 86 *The Craters*; 87 *The Poles*; 88 *South Pole–Aitken*; 89 *The Maria*; 90 *The Orbit*; 91 *LEF Mechanism 2*; 92 *LEF Mechanism in Principle*; 93 *The Stripes*; 94 *The Craters*; 95 *The Poles*; 96 *South Pole–Aitken*; 97 *The Maria*; 98 *The Orbit*; 99 *LEF Mechanism 2*; 100 *LEF Mechanism in Principle*; 101 *The Stripes*; 102 *The Craters*; 103 *The Poles*; 104 *South Pole–Aitken*; 105 *The Maria*; 106 *The Orbit*; 107 *LEF Mechanism 2*; 108 *LEF Mechanism in Principle*; 109 *The Stripes*; 110 *The Craters*; 111 *The Poles*; 112 *South Pole–Aitken*; 113 *The Maria*; 114 *The Orbit*; 115 *LEF Mechanism 2*; 116 *LEF Mechanism in Principle*; 117 *The Stripes*; 118 *The Craters*; 119 *The Poles*; 120 *South Pole–Aitken*; 121 *The Maria*; 122 *The Orbit*; 123 *LEF Mechanism 2*; 124 *LEF Mechanism in Principle*; 125 *The Stripes*; 126 *The Craters*; 127 *The Poles*; 128 *South Pole–Aitken*; 129 *The Maria*; 130 *The Orbit*; 131 *LEF Mechanism 2*; 132 *LEF Mechanism in Principle*; 133 *The Stripes*; 134 *The Craters*; 135 *The Poles*; 136 *South Pole–Aitken*; 137 *The Maria*; 138 *The Orbit*; 139 *LEF Mechanism 2*; 140 *LEF Mechanism in Principle*; 141 *The Stripes*; 142 *The Craters*; 143 *The Poles*; 144 *South Pole–Aitken*; 145 *The Maria*; 146 *The Orbit*; 147 *LEF Mechanism 2*; 148 *LEF Mechanism in Principle*; 149 *The Stripes*; 150 *The Craters*; 151 *The Poles*; 152 *South Pole–Aitken*; 153 *The Maria*; 154 *The Orbit*; 155 *LEF Mechanism 2*; 156 *LEF Mechanism in Principle*; 157 *The Stripes*; 158 *The Craters*; 159 *The Poles*; 160 *South Pole–Aitken*; 161 *The Maria*; 162 *The Orbit*; 163 *LEF Mechanism 2*; 164 *LEF Mechanism in Principle*; 165 *The Stripes*; 166 *The Craters*; 167 *The Poles*; 168 *South Pole–Aitken*; 169 *The Maria*; 170 *The Orbit*; 171 *LEF Mechanism 2*; 172 *LEF Mechanism in Principle*; 173 *The Stripes*; 174 *The Craters*; 175 *The Poles*; 176 *South Pole–Aitken*; 177 *The Maria*; 178 *The Orbit*; 179 *LEF Mechanism 2*; 180 *LEF Mechanism in Principle*; 181 *The Stripes*; 182 *The Craters*; 183 *The Poles*; 184 *South Pole–Aitken*; 185 *The Maria*; 186 *The Orbit*; 187 *LEF Mechanism 2*; 188 *LEF Mechanism in Principle*; 189 *The Stripes*; 190 *The Craters*; 191 *The Poles*; 192 *South Pole–Aitken*; 193 *The Maria*; 194 *The Orbit*; 195 *LEF Mechanism 2*; 196 *LEF Mechanism in Principle*; 197 *The Stripes*; 198 *The Craters*; 199 *The Poles*; 200 *South Pole–Aitken*; 201 *The Maria*; 202 *The Orbit*; 203 *LEF Mechanism 2*; 204 *LEF Mechanism in Principle*; 205 *The Stripes*; 206 *The Craters*; 207 *The Poles*; 208 *South Pole–Aitken*; 209 *The Maria*; 210 *The Orbit*; 211 *LEF Mechanism 2*; 212 *LEF Mechanism in Principle*; 213 *The Stripes*; 214 *The Craters*; 215 *The Poles*; 216 *South Pole–Aitken*; 217 *The Maria*; 218 *The Orbit*; 219 *LEF Mechanism 2*; 220 *LEF Mechanism in Principle*; 221 *The Stripes*; 222 *The Craters*; 223 *The Poles*; 224 *South Pole–Aitken*; 225 *The Maria*; 226 *The Orbit*; 227 *LEF Mechanism 2*; 228 *LEF Mechanism in Principle*; 229 *The Stripes*; 230 *The Craters*; 231 *The Poles*; 232 *South Pole–Aitken*; 233 *The Maria*; 234 *The Orbit*; 235 *LEF Mechanism 2*; 236 *LEF Mechanism in Principle*; 237 *The Stripes*; 238 *The Craters*; 239 *The Poles*; 240 *South Pole–Aitken*; 241 *The Maria*; 242 *The Orbit*; 243 *LEF Mechanism 2*; 244 *LEF Mechanism in Principle*; 245 *The Stripes*; 246 *The Craters*; 247 *The Poles*; 248 *South Pole–Aitken*; 249 *The Maria*; 250 *The Orbit*; 251 *LEF Mechanism 2*; 252 *LEF Mechanism in Principle*; 253 *The Stripes*; 254 *The Craters*; 255 *The Poles*; 256 *South Pole–Aitken*; 257 *The Maria*; 258 *The Orbit*; 259 *LEF Mechanism 2*; 260 *LEF Mechanism in Principle*; 261 *The Stripes*; 262 *The Craters*; 263 *The Poles*; 264 *South Pole–Aitken*; 265 *The Maria*; 266 *The Orbit*; 267 *LEF Mechanism 2*; 268 *LEF Mechanism in Principle*; 269 *The Stripes*; 270 *The Craters*; 271 *The Poles*; 272 *South Pole–Aitken*; 273 *The Maria*; 274 *The Orbit*; 275 *LEF Mechanism 2*; 276 *LEF Mechanism in Principle*; 277 *The Stripes*; 278 *The Craters*; 279 *The Poles*; 280 *South Pole–Aitken*; 281 *The Maria*; 282 *The Orbit*; 283 *LEF Mechanism 2*; 284 *LEF Mechanism in Principle*; 285 *The Stripes*; 286 *The Craters*; 287 *The Poles*; 288 *South Pole–Aitken*; 289 *The Maria*; 290 *The Orbit*; 291 *LEF Mechanism 2*; 292 *LEF Mechanism in Principle*; 293 *The Stripes*; 294 *The Craters*; 295 *The Poles*; 296 *South Pole–Aitken*; 297 *The Maria*; 298 *The Orbit*; 299 *LEF Mechanism 2*; 300 *LEF Mechanism in Principle*; 301 *The Stripes*; 302 *The Craters*; 303 *The Poles*; 304 *South Pole–Aitken*; 305 *The Maria*; 306 *The Orbit*; 307 *LEF Mechanism 2*; 308 *LEF Mechanism in Principle*; 309 *The Stripes*; 310 *The Craters*; 311 *The Poles*; 312 *South Pole–Aitken*; 313 *The Maria*; 314 *The Orbit*; 315 *LEF Mechanism 2*; 316 *LEF Mechanism in Principle*; 317 *The Stripes*; 318 *The Craters*; 319 *The Poles*; 320 *South Pole–Aitken*; 321 *The Maria*; 322 *The Orbit*; 323 *LEF Mechanism 2*; 324 *LEF Mechanism in Principle*; 325 *The Stripes*; 326 *The Craters*; 327 *The Poles*; 328 *South Pole–Aitken*; 329 *The Maria*; 330 *The Orbit*; 331 *LEF Mechanism 2*; 332 *LEF Mechanism in Principle*; 333 *The Stripes*; 334 *The Craters*; 335 *The Poles*; 336 *South Pole–Aitken*; 337 *The Maria*; 338 *The Orbit*; 339 *LEF Mechanism 2*; 340 *LEF Mechanism in Principle*; 341 *The Stripes*; 342 *The Craters*; 343 *The Poles*; 344 *South Pole–Aitken*; 345 *The Maria*; 346 *The Orbit*; 347 *LEF Mechanism 2*; 348 *LEF Mechanism in Principle*; 349 *The Stripes*; 350 *The Craters*; 351 *The Poles*; 352 *South Pole–Aitken*; 353 *The Maria*; 354 *The Orbit*; 355 *LEF Mechanism 2*; 356 *LEF Mechanism in Principle*; 357 *The Stripes*; 358 *The Craters*; 359 *The Poles*; 360 *South Pole–Aitken*; 361 *The Maria*; 362 *The Orbit*; 363 *LEF Mechanism 2*; 364 *LEF Mechanism in Principle*; 365 *The Stripes*; 366 *The Craters*; 367 *The Poles*; 368 *South Pole–Aitken*; 369 *The Maria*; 370 *The Orbit*; 371 *LEF Mechanism 2*; 372 *LEF Mechanism in Principle*; 373 *The Stripes*; 374 *The Craters*; 375 *The Poles*; 376 *South Pole–Aitken*; 377 *The Maria*; 378 *The Orbit*; 379 *LEF Mechanism 2*; 380 *LEF Mechanism in Principle*; 381 *The Stripes*; 382 *The Craters*; 383 *The Poles*; 384 *South Pole–Aitken*; 385 *The Maria*; 386 *The Orbit*; 387 *LEF Mechanism 2*; 388 *LEF Mechanism in Principle*; 389 *The Stripes*; 390 *The Craters*; 391 *The Poles*; 392 *South Pole–Aitken*; 393 *The Maria*; 394 *The Orbit*; 395 *LEF Mechanism 2*; 396 *LEF Mechanism in Principle*; 397 *The Stripes*; 398 *The Craters*; 399 *The Poles*; 400 *South Pole–Aitken*; 401 *The Maria*; 402 *The Orbit*; 403 *LEF Mechanism 2*; 404 *LEF Mechanism in Principle*; 405 *The Stripes*; 406 *The Craters*; 407 *The Poles*; 408 *South Pole–Aitken*; 409 *The Maria*; 410 *The Orbit*; 411 *LEF Mechanism 2*; 412 *LEF Mechanism in Principle*; 413 *The Stripes*; 414 *The Craters*; 415 *The Poles*; 416 *South Pole–Aitken*; 417 *The Maria*; 418 *The Orbit*; 419 *LEF Mechanism 2*; 420 *LEF Mechanism in Principle*; 421 *The Stripes*; 422 *The Craters*; 423 *The Poles*; 424 *South Pole–Aitken*; 425 *The Maria*; 426 *The Orbit*; 427 *LEF Mechanism 2*; 428 *LEF Mechanism in Principle*; 429 *The Stripes*; 430 *The Craters*; 431 *The Poles*; 432 *South Pole–Aitken*; 433 *The Maria*; 434 *The Orbit*; 435 *LEF Mechanism 2*; 436 *LEF Mechanism in Principle*; 437 *The Stripes*; 438 *The Craters*; 439 *The Poles*; 440 *South Pole–Aitken*; 441 *The Maria*; 442 *The Orbit*; 443 *LEF Mechanism 2*; 444 *LEF Mechanism in Principle*; 445 *The Stripes*; 446 *The Craters*; 447 *The Poles*; 448 *South Pole–Aitken*; 449 *The Maria*; 450 *The Orbit*; 451 *LEF Mechanism 2*; 452 *LEF Mechanism in Principle*; 453 *The Stripes*; 454 *The Craters*; 455 *The Poles*; 456 *South Pole–Aitken*; 457 *The Maria*; 458 *The Orbit*; 459 *LEF Mechanism 2*; 460 *LEF Mechanism in Principle*; 461 *The Stripes*; 462 *The Craters*; 463 *The Poles*; 464 *South Pole–Aitken*; 465 *The Maria*; 466 *The Orbit*; 467 *LEF Mechanism 2*; 468 *LEF Mechanism in Principle*; 469 *The Stripes*; 470 *The Craters*; 471 *The Poles*; 472 *South Pole–Aitken*; 473 *The Maria*; 474 *The Orbit*; 475 *LEF Mechanism 2*; 476 *LEF Mechanism in Principle*; 477 *The Stripes*; 478 *The Craters*; 479 *The Poles*; 480 *South Pole–Aitken*; 481 *The Maria*; 482 *The Orbit*; 483 *LEF Mechanism 2*; 484 *LEF Mechanism in Principle*; 485 *The Stripes*; 486 *The Craters*; 487 *The Poles*; 488 *South Pole–Aitken*; 489 *The Maria*; 490 *The Orbit*; 491 *LEF Mechanism 2*; 492 *LEF Mechanism in Principle*; 493 *The Stripes*; 494 *The Craters*; 495 *The Poles*; 496 *South Pole–Aitken*; 497 *The Maria*; 498 *The Orbit*; 499 *LEF Mechanism 2*; 500 *LEF Mechanism in Principle*; 501 *The Stripes*; 502 *The Craters*; 503 *The Poles*; 504 *South Pole–Aitken*; 505 *The Maria*; 506 *The Orbit*; 507 *LEF Mechanism 2*; 508 *LEF Mechanism in Principle*; 509 *The Stripes*; 510 *The Craters*; 511 *The Poles*; 512 *South Pole–Aitken*; 513 *The Maria*; 514 *The Orbit*; 515 *LEF Mechanism 2*; 516 *LEF Mechanism in Principle*; 517 *The Stripes*; 518 *The Craters*; 519 *The Poles*; 520 *South Pole–Aitken*; 521 *The Maria*; 522 *The Orbit*; 523 *LEF Mechanism 2*; 524 *LEF Mechanism in Principle*; 525 *The Stripes*; 526 *The Craters*; 527 *The Poles*; 528 *South Pole–Aitken*; 529 *The Maria*; 530 *The Orbit*; 531 *LEF Mechanism 2*; 532 *LEF Mechanism in Principle*; 533 *The Stripes*; 534 *The Craters*; 535 *The Poles*; 536 *South Pole–Aitken*; 537 *The Maria*; 538 *The Orbit*; 539 *LEF Mechanism 2*; 540 *LEF Mechanism in Principle*; 541 *The Stripes*; 542 *The Craters*; 543 *The Poles*; 544 *South Pole–Aitken*; 545 *The Maria*; 546 *The Orbit*; 547 *LEF Mechanism 2*; 548 *LEF Mechanism in Principle*; 549 *The Stripes*; 550 *The Craters*; 551 *The Poles*; 552 *South Pole–Aitken*; 553 *The Maria*; 554 *The Orbit*; 555 *LEF Mechanism 2*; 556 *LEF Mechanism in Principle*; 557 *The Stripes*; 558 *The Craters*; 559 *The Poles*; 560 *South Pole–Aitken*; 561 *The Maria*; 562 *The Orbit*; 563 *LEF Mechanism 2*; 564 *LEF Mechanism in Principle*; 565 *The Stripes*; 566 *The Craters*; 567 *The Poles*; 568 *South Pole–Aitken*; 569 *The Maria*; 570 *The Orbit*; 571 *LEF Mechanism 2*; 572 *LEF Mechanism in Principle*; 573 *The Stripes*; 574 *The Craters*; 575 *The Poles*; 576 *South Pole–Aitken*; 577 *The Maria*; 578 *The Orbit*; 579 *LEF Mechanism 2*; 580 *LEF Mechanism in Principle*; 581 *The Stripes*; 582 *The Craters*; 583 *The Poles*; 584 *South Pole–Aitken*; 585 *The Maria*; 586 *The Orbit*; 587 *LEF Mechanism 2*; 588 *LEF Mechanism in Principle*; 589 *The Stripes*; 590 *The Craters*; 591 *The Poles*; 592 *South Pole–Aitken*; 593 *The Maria*; 594 *The Orbit*; 595 *LEF Mechanism 2*; 596 *LEF Mechanism in Principle*; 597 *The Stripes*; 598 *The Craters*; 599 *The Poles*; 600 *South Pole–Aitken*; 601 *The Maria*; 602 *The Orbit*; 603 *LEF Mechanism 2*; 604 *LEF Mechanism in Principle*; 605 *The Stripes*; 606 *The Craters*; 607 *The Poles*; 608 *South Pole–Aitken*; 609 *The Maria*; 610 *The Orbit*; 611 *LEF Mechanism 2*; 612 *LEF Mechanism in Principle*; 613 *The Stripes*; 614 *The Craters*; 615 *The Poles*; 616 *South Pole–Aitken*; 617 *The Maria*; 618 *The Orbit*; 619 *LEF Mechanism 2*; 620 *LEF Mechanism in Principle*; 621 *The Stripes*; 622 *The Craters*; 623 *The Poles*; 624 *South Pole–Aitken*; 625 *The Maria*; 626 *The Orbit*; 627 *LEF Mechanism 2*; 628 *LEF Mechanism in Principle*; 629 *The Stripes*; 630 *The Craters*; 631 *The Poles*; 632 *South Pole–Aitken*; 633 *The Maria*; 634 *The Orbit*; 635 *LEF Mechanism 2*; 636 *LEF Mechanism in Principle*; 637 *The Stripes*; 638 *The Craters*; 639 *The Poles*; 640 *South Pole–Aitken*; 641 *The Maria*; 642 *The Orbit*; 643 *LEF Mechanism 2*; 644 *LEF Mechanism in Principle*; 645 *The Stripes*; 646 *The Craters*; 647 *The Poles*; 648 *South Pole–Aitken*; 649 *The Maria*; 650 *The Orbit*; 651 *LEF Mechanism 2*; 652 *LEF Mechanism in Principle*; 653 *The Stripes*; 654 *The Craters*; 655 *The Poles*; 656 *South Pole–Aitken*; 657 *The Maria*; 658 *The Orbit*; 659 *LEF Mechanism 2*; 660 *LEF Mechanism in Principle*; 661 *The Stripes*; 662 *The Craters*; 663 *The Poles*; 664 *South Pole–Aitken*; 665 *The Maria*; 666 *The Orbit*; 667 *LEF Mechanism 2*; 668 *LEF Mechanism in Principle*; 669 *The Stripes*; 670 *The Craters*; 671 *The Poles*; 672 *South Pole–Aitken*; 673 *The Maria*; 674 *The Orbit*; 675 *LEF Mechanism 2*; 676 *LEF Mechanism in Principle*; 677 *The Stripes*; 678 *The Craters*; 679 *The Poles*; 680 *South Pole–Aitken*; 681 *The Maria*; 682 *The Orbit*; 683 *LEF Mechanism 2*; 684 *LEF Mechanism in Principle*; 685 *The Stripes*; 686 *The Craters*; 687 *The Poles*; 688 *South Pole–Aitken*; 689 *The Maria*; 690 *The Orbit*; 691 *LEF Mechanism 2*; 692 *LEF Mechanism in Principle*; 693 *The Stripes*; 694 *The Craters*; 695 *The Poles*; 696 *South Pole–Aitken*; 697 *The Maria*; 698 *The Orbit*; 699 *LEF Mechanism 2*; 700 *LEF Mechanism in Principle*; 701 *The Stripes*; 702 *The Craters*; 703 *The Poles*; 704 *South Pole–Aitken*; 705 *The Maria*; 706 *The Orbit*; 707 *LEF Mechanism 2*; 708 *LEF Mechanism in Principle*; 709 *The Stripes*; 710 *The Craters*; 711 *The Poles*; 712 *South Pole–Aitken*; 713 *The Maria*; 714 *The Orbit*; 715 *LEF Mechanism 2*; 716 *LEF Mechanism in Principle*; 717 *The Stripes*; 718 *The Craters*; 719 *The Poles*; 720 *South Pole–Aitken*; 721 *The Maria*; 722 *The Orbit*; 723 *LEF Mechanism 2*; 724 *LEF Mechanism in Principle*; 725 *The Stripes*; 726 *The Craters*; 727 *The Poles*; 728 *South Pole–Aitken*; 729 *The Maria*; 730 *The Orbit*; 731 *LEF Mechanism 2*; 732 *LEF Mechanism in Principle*; 733 *The Stripes*; 734 *The Craters*; 735 *The Poles*; 736 *South Pole–Aitken*; 737 *The Maria*; 738 *The Orbit*; 739 *LEF Mechanism 2*; 740 *LEF Mechanism in Principle*; 741 *The Stripes*; 742 *The Craters*; 743 *The Poles*; 744 *South Pole–Aitken*; 745 *The Maria*; 746 *The Orbit*; 747 *LEF Mechanism 2*; 748 *LEF Mechanism in Principle*; 749 *The Stripes*; 750 *The Craters*; 751 *The Poles*; 752 *South Pole–Aitken*; 753 *The Maria*; 754 *The Orbit*; 755 *LEF Mechanism 2*; 756 *LEF Mechanism in Principle*; 757 *The Stripes*; 758 *The Craters*; 759 *The Poles*; 760 *South Pole–Aitken*; 761 *The Maria*; 762 *The Orbit*; 763 *LEF Mechanism 2*; 764 *LEF Mechanism in Principle*; 765 *The Stripes*; 766 *The Craters*; 767 *The Poles*; 768 *South Pole–Aitken*; 769 *The Maria*; 770 *The Orbit*; 771 *LEF Mechanism 2*; 772 *LEF Mechanism in Principle*; 773 *The Stripes*; 774 *The Craters*; 775 *The Poles*; 776 *South Pole–Aitken*; 777 *The Maria*; 778 *The Orbit*; 779 *LEF Mechanism 2*; 780 *LEF Mechanism in Principle*; 781 *The Stripes*; 782 *The Craters*; 783 *The Poles*; 784 *South Pole–Aitken*; 785 *The Maria*; 786 *The Orbit*; 787 *LEF Mechanism 2*; 788 *LEF Mechanism in Principle*; 789 *The Stripes*; 790 *The Craters*; 791 *The Poles*; 792 *South Pole–Aitken*; 793 *The Maria*; 794 *The Orbit*; 795 *LEF Mechanism 2*; 796 *LEF Mechanism in Principle*; 797 *The Stripes*; 798 *The Craters*; 799 *The Poles*; 800 *South Pole–Aitken*; 801 *The Maria*; 802 *The Orbit*; 803 *LEF Mechanism 2*; 804 *LEF Mechanism in Principle*; 805 *The Stripes*; 806 *The Craters*; 807 *The Poles*; 808 *South Pole–Aitken*; 809 *The Maria*; 810 *The Orbit*; 811 *LEF Mechanism 2*; 812 *LEF Mechanism in Principle*; 813 *The Stripes*; 814 *The Craters*; 815 *The Poles*; 816 *South Pole–Aitken*; 817 *The Maria*; 818 *The Orbit*; 819 *LEF Mechanism 2*; 820 *LEF Mechanism in Principle*; 821 *The Stripes*; 822 *The Craters*; 823 *The Poles*; 824 *South Pole–Aitken*; 825 *The Maria*; 826 *The Orbit*; 827 *LEF Mechanism 2*; 828 *LEF Mechanism in Principle*; 829 *The Stripes*; 830

כפרה-פרינטיס ב-Preprints.org, וגרסאות מוקדמות שלהם ב-doi:10.5281/zenodo.22743615; הם המקור לחישובים של המודל, ואינם אימות חיצוני שלו.

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, שהוגשה ב-22 ביולי 2026) עבור מתקן הנדסי הקשור למודל.

שימוש בכלי AI: המחבר השתמש בעוזרי AI (Claude של Anthropic; ChatGPT של OpenAI) לכתיבה והרצה של תסריטי החישוב, לניתוח הקטלוגים והמפות, להכנת איורים וטבלאות, ולעריכת לשון ותרגום. המודל, רעיונותיו ומסקנותיו הם של המחבר. המחבר בדק את התוכן ונושא באחריות המלאה לו.