

THE LEF MODEL · A SERIES OF TWELVE PAPERS

Lunar Elevation & Fission

11. הדרישות

מה המנגנון מחייב, מה יש בירח, ומה נשאר פתוח

חלקים A-D · נספחים A-B · שבע דרישות ועוד אחת-עשרה (R8-R18) · שלושה-עשר מקורות

זהר דוראן

חוקר עצמאי, רמלה, ישראל

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

תרגום מלא לעברית של המאמר האנגלי · 15 באוקטובר 2026

הסביבה שממנה נגזרות הדרישות

כל דרישה במאמר הזה נגזרת מתמונה של האופן שבו נוצר הירח. לכן, לפני שנציג את הדרישות, נפרוש את התמונה הזאת: המסות, הגדלים, הסיבוב, המרחקים והחומרים שהמאמרים הקודמים בסדרה מייחסים לזמן ההיווצרות. הטבלה שלהלן היא הבסיס המשותף לכל מה שבא אחריה; כשסעיף מאוחר יותר אומר ש"המנגנון דורש" דבר מה, הכוונה היא שהדרישה נובעת מן התנאים האלה.

המאמר מבחין בין סביבת ההיווצרות המשוערת לבין הירח כפי שהוא נמדד היום. אי אפשר להשתמש בתצפית על מצב מאוחר כתנאי התחלה בלי מודל שמקשר בין שני המצבים. הירח שאנו מודדים עבר מאז היווצרותו מיליארדי שנים של התקררות, געשיות מאוחרת ונחיתות על פניו; תכונה שנראית היום יכולה להיות תוצר של ההיווצרות או תוספת מאוחרת, ויש להפריד בין השתיים.

איך לקרוא את הטבלה. העמודה הראשונה מציינת את התחום; השנייה נותנת את הערך או את התמונה שמשמשים בתרחיש; השלישית אומרת איזה סוג של גודל זה — הנחת תרחיש, קלט של הסדרה, דוגמה להמחשה — ועם מה אין לבלבל אותו. העמודה השלישית חשובה לא פחות מן השנייה: היא מסמנת היכן מספר הוא מדידה, היכן הוא בחירה בתוך טווח מותר, והיכן שני מספרים שנראים דומים הם גדלים שונים.

תחום	סביבת התרחיש והפרמטרים	מעמד ותפקיד במאמר
זמן	תחילת התרחיש לפני כ-4.5 מיליארד שנה; חלון של עד כ-600 מיליון שנה נשמר לבדיקה. בציר הזמן הגס של הסדרה עוברים כ-600 מיליון שנה מתחילת הבליטה ועד שחרור הירח לפני 3.873 מיליארד שנה: כ-400 לבליטה ולאגס, כ-100 לפחיסות וכ-100 עד השחרור	הנחת תרחיש; הפרשי גיל בין הקרום לבזלת אינם מדידה של משך הבנייה, משום שגיל של בזלת מתארך התפרצות מאוחרת, ולא את היווצרות הקרום שמתחתיה
מסת גוף האם ההתחלתית	$M_0 = M_E + M_L = 6.0455 \times 10^{24}$ ק"ג: "גוף האם" הוא כדור הארץ לפני שהירח עזב אותו, ולכן מסתו היא מסת כדור הארץ של היום M_E ועוד מסת הירח של היום M_L	לפני העברת החומר, מסת הירח העתידי כלולה בגוף האם
מסות ייחוס לאחר ההעברה	$M_E = 5.972 \times 10^{24}$, $M_L = 7.35 \times 10^{22}$ ק"ג	קלטים של הסדרה; לאורך מסלול ההעברה יש לעקוב גם אחר מסת החיבור ואחר החומר שאבד, משום שבשלבי ביניים חלק מן המסה אינו בכדור הארץ וגם עדיין אינו בירח
רדיוס גוף האם	רדיוס נפחי 6,517 ק"מ (הרדיוס של כדור שנפחו כנפח גוף האם); רדיוס משווני 6,721 ק"מ בדוגמת המבנה ההתחלתי (גדול יותר, משום שאוף שמסתובב מהר מתנפח בקו המשווה שלו)	גדלים שונים, שאינם ניתנים להחלפה זה בזה באותה משוואה

סיבוב 5.5 שעות בהתחלה בדוגמת הייחוס, 5.77 שעות בשחרור (האגס המתארך מאט את הסיבוב והליבה המתרכזת מאיצה אותו, מאמר 2); הסיבוב משתנה עם התנע הזוויתי ועם מומנט ההתמד. תנע זוויתי הוא כמות הסיבוב הכוללת, והיא נשארת קבועה אלא אם משהו מבחוץ מפעיל פיתול; מומנט ההתמד מודד כמה רחוק מציר הסיבוב מונחת המסה. כמו אצל מחליקה, מסה שזזה החוצה (האגס) מאטה את הסיבוב, ומסה שנמשכת פנימה (ברזל ששוקע אל הליבה) מאיצה אותו	עריך בתוך התחום הקביל של מאמר 2, ולא זמן מחזור קבוע לכל משך הבנייה	
קורוטציה 15,818 ק"מ ב-5.5 שעות; בשחרור, ב-5.77 שעות, 16,331 ק"מ (חלקיק בוחן) ו-16,399 ק"מ (שני גופים) על קו המשווה, 17,287 ק"מ ב-22.5° (מאמרים 2 ו-4); הירח משתחרר כשמרכז המסה שלו מגיע אל הקו. קו הקורוטציה הוא המרחק ממרכז כדור הארץ שבו גוף שמסתובב יחד עם כדור הארץ, פעם אחת בכל סיבוב, כבר נע במהירות של מסלול מעגלי חופשי. בתוכו, גוף שנישא סביב עם כדור הארץ איטי מכדי להקיף, וחייב להיות מוחזק על ידי החיבור שלו; על הקו הוא אינו זקוק לתמיכה. הלוויינים הגאוסטציונריים של היום יושבים על הקו הזה, עבור אורך היממה הנוכחי; ביממה של 5.77 שעות הקו היה קרוב בהרבה, ב-16,399 ק"מ, כ-2.6 רדיוסי כדור הארץ. הערך של "חלקיק בוחן" מתייחס לירח כחסר מסה; ערך "שני הגופים" מביא בחשבון את מסתו, ו-22.5° הוא הקו עבור גוף שמרכזו מחוץ לקו המשווה	מצבים והגדרות ממאמר 2; קורוטציה אינה תנאי מספיק לשחרור: החיבור חייב גם להיכשל, והגוף המשוחרר חייב להחזיק מעמד כגוף אחד מול הגאות של כדור הארץ (מאמר 2; §4.C)	
כבידה כ-8.25 מ"ש² הוא אומדן משווני מסוים על גוף האם ההתחלתי; זו אינה הכבידה על הירח. הוא נמוך מכבידת פני כדור הארץ של היום, משום שקו המשווה של גוף האם היה רחוק יותר ממרכזו, והסיבוב המהיר שלו קיזז חלק מן המשיכה	השדה תלוי במיקום, במסה שהועברה ובמבנה הפנימי	

גודל הגוף	כ-2,270 ק"מ בצפיפות 1,500 וכ-1,890 ק"מ בצפיפות 2,600, עבור מסת היעד המלאה: הרדיוס שהיה לגוף בעל מסת הירח המלאה בכל צפיפות ממוצעת (ק"ג/מ"ק); ככל שהגוף קל יותר, חם יותר ועשיר יותר בחומרים נדיפים, כך הוא גדול יותר. הירח של היום צפוף יותר וקטן יותר משניהם	מצבים להמחשה ממאמר 3, ולא היסטוריית התכווצות מחושבת
ארגון פנימי	התמיינות מתמשכת של מתכת וסיליקט בתרחיש: הברזל שוקע פנימה והסיליקט הקל עולה, בתוך כדור הארץ ובתוך הגוף המתפתח	יש ליישב זאת עם מומנט ההתמד ועם הכרונומטריה (תיארוך בשעונים רדיואקטיביים); ליבה ירחית קטנה אינה מודדת את מצב ליבת כדור הארץ באותו זמן
מקור החומר	הזנה מן המאגר העמוק, ובמקביל הקליפה הסיאלית החיצונית של גוף האם, שעולה עם הגוף כפני השטח של הכיפה. סיאל היא השכבה החיצונית הקלה של כדור הארץ, העשירה בצורן ובאלומיניום; מתחתיה נמצאת הסימה הצפופה יותר	שני מקורות ארציים, גוף אחד, מאזן מסה אחד (מאמר 3)
מקור הפליטות	חומר עמוק שעולה דרך פתחים בקליפה	הפליטה אינה מוגדרת כחומר שנתלש מן הקליפה עצמה
חומרים נדיפים	מלאי קדום גדול בתרחיש של המחבר, כולל בתוך כדור הארץ. חומרים נדיפים הם חומרים שהופכים בקלות לגז — מים לפני הכול — ומורידים את נקודת ההתכה ואת הקשיחות של החומר שנושא אותם	אין ריכוז מאומת למערכת כולה; המצב — מומס, נוזל צפוף או גז — תלוי בלחץ, בחום ובהרכב
אטמוספירה והתקררות	העברת חום החוצה, אפשרות של מחזור עלייה-התקררות-חזרה של חומרים נדיפים	להתקררות נדרשת פליטה נטו אל החלל; מחזור פנימי לבדו אינו מאזן אנרגיה, משום שחום שעובר מרמה אחת לאחרת בתוך המערכת אינו חום שאבד
ראולוגיה	ראולוגיה היא האופן שבו חומר זורם או מתנגד לזרימה. הקליפה קשיחה וקרה בפני השטח וניידת בבסיסה; הממשק עם הפנים הוא השכבה החלשה ביותר	מאמר 3 דורש קליפה קשיחה מספיק כדי לשמור על המכתשים שלה ($\approx 10^{23}$ פסקל-שנייה) מעל פנים נייד. צמיגות, בפסקל-שנייה, מודדת התנגדות לזרימה; בערך הזה הקליפה אינה זורמת במידה ניכרת בפרקי הזמן הרלוונטיים, ולכן מכתש שומר על צורתו

הקליפה	עובי כ-18 ק"מ, צפיפות 2,800 ק"ג/מ"ק, על פני שטח של חצי כדור שבסיסו 6,000 ק"מ ² (5.65×10^{13})	כ- 2.85×10^{21} ק"ג, 3.9% ממסת הירח; נסגרת על חצי הכדור הרחוק כקרום של 50–60 ק"מ (מאמר 3). ההתעבות היא עניין של שטח: העור של הכיפה הגדולה נאסף על חצי הכדור הרחוק הקטן יותר של הירח הגמור, ונעשה עבה פי שלושה בערך
הגאומטריה המחוברת	הכיפה היא קצה האגס, העשוי מחומר של כדור הארץ עצמו, ברוחב של כ-9,000 ק"מ בפני השטח; בסיס האגס, עם הפתחים שלו, נמצא סמוך ל-Kiritimati (כ-1.9° צפון, 157.5° מערב, במרכז האוקיינוס השקט), מעל ה-LLVP של האוקיינוס השקט — אזור איטי גדול במעטפת התחתונה, אזור רחב בתחתית המעטפת של כדור הארץ שבו גלים סייסמיים נעים לאט; בסיס הכיפה פונה אל גוף האם, ובשחרור המגע הוא דיסקה ברוחב 3,000 ק"מ, רבע משטח הבסיס	החיבור רחב וחס; דיסקת המגע הופכת לכיפה בצד הקרוב בגודל של כ-41° (שפתה נמצאת 41° ממרכז הצד הקרוב) בכלל ששימש למבחני ספטמבר, ובגודל של 31° בכלל הנוכחי של מאמר 3 (B.8§); הגוף מתקלף מן הסיאל שעליו ישב ויוצא איתו (מאמר 3)
סדר התרחיש	הפליטה ועליית הכיפה חופפות; הפליטה דועכת לפני שהכיפה נסגרת; הכיפה נסגרת לפני הניתוק	הסדר של מאמר 3; זמני המעבר אינם מדודים
פני הירח היום	קרום, אגני פגיעה (כפי שהספרות מכנה אותם), מילוי בזלתי ושינויים מאוחרים	יש להבחין בין תכונה של ההיווצרות לבין מה שנשמר לאחר מכן

הטבלה מציבה את הבמה במקום אחד: כדור ארץ שמסתובב מהר, כבד יותר במסה של ירח אחד; אגס מחומר שלו, שקצהו נעשה הירח; קליפה קשיחה שנישאת למעלה כפני השטח של הקצה הזה; ושחרור בקו הקורוטציה. כל דרישה שלהלן שואלת מה הבמה הזאת חייבת הייתה להשאיר על הירח ועל כדור הארץ.

תקציר

במודל LEF הירח נבנה מחומר של כדור הארץ בזמן שהיה מחובר אליו: חומר עמוק הוזן אל הגוף המתפתח, ובמקביל הקליפה החיצונית של גוף האם מעל האזור עלתה איתו כפני השטח של כיפה, ונעשתה לקרום שלו. מאמר 2 מציג את המנגנון בעיקרון, כולל התנאים המסלוליים של השחרור, ומאמר 3 את המנגנון בפועל. המאמר הזה שואל אילו תכונות דרך הבנייה הזאת צריכה ליצור, ועד כמה הן מתאימות לתצפיות.

דרישה, במאמר הזה, היא תכונה שהירח (או כדור הארץ) חייב שתהיה לו אם הוא נוצר בדרך הזאת. כל דרישה מוצגת בשלושה חלקים: התנאי שהמודל חייב לעמוד בו, הגודל שבודק אותו, והתוצאה שהייתה פוסלת אותו (קריטריון ההפרכה). אנו משתמשים בדרישות ולא בציון מצטבר, משום שכמה התאמות יכולות להיות עובדה אחת שנראית בכמה דרכים, ומשום שכישלון ברור אחד חייב להיחשב כישלון, יהיו ההתאמות האחרות רבות ככל שיהיו.

נבחנות שבע דרישות: זיקה איזוטופית למקורות ארציים (יחסי האיזוטופים של הירח חייבים להתאים לאלה של חומר ארצי), העברת מתכת בכמות שמתיישבת עם ליבה קטנה, אסימטריה של הקרום, כיוון שקשור לצד החיבור, סדר של התקררות ושימור, חומרים נדיפים שהיו זמינים בזמן ההעברה, וקשר בין פיזור הקרום לבין מרכז המסה. לכל דרישה המאמר מגדיר את התנאים שבבסיסה, את הגודל שיש לבדוק ואת התוצאה שהייתה פוסלת אותה. הנתונים תומכים בקיומן של כמה מן התכונות הכלליות, אך אינם מאשרים כשלעצמם את הדרך שבה הן נוצרו. בפרט, גילי בזלת אינם קובעים את גיל הקרום שמתחתיהן; תכולת המים של מאגמה שנדגמה אינה קובעת את מלאי החומרים הנדיפים בזמן הבנייה; וסיבוב סינכרוני בהווה (הירח מסתובב פעם אחת בכל הקפה, ולכן מפנה פנים אחד אל כדור הארץ) אינו מוכיח סינכרוניות רציפה מאז החיבור.

כאן נגזר מבחן משותף לעובי הקרום ולהיסט מרכז המסה. מרכז המסה של הירח אינו נמצא במרכז הגאומטרי של צורתו; קרום קל שרבה יותר בצד אחד מזיז את מרכז המסה לכיוון הצד השני. בדוגמה מוגדרת מתקבל היסט של 1.24–3.11 ק"מ עבור ניגודי צפיפות (ההפרש בצפיפות בין הקרום לחומר שמתחתיו) של 300–750 ק"ג/מ"ק. זהו טווח רגישות מחושב, ולא חיזוי בלתי תלוי של ההיסט הנצפה. מאזן נוסף מראה שהקליפה של הכיפה, שהתעבתה פי שלושה בעת הסגירה, מספקת את הקרום של הצד הרחוק, כ-4% ממסת הירח — המסה של GRAIL (משימת מיפוי הכבידה של הירח של NASA) מוצאת לצד הזה; הקרום של הצד הקרוב הוא הסיאל של הבסיס, שהתקלף עם הגוף, הותך מעל המגע והוחלק בחום, והוא הדק ביותר מתחת לימות, הפתחים; זהו איבר נפרד. התוצאה של המאמר היא מערכת מוגדרת של מבחנים למודל: התאמות תצפיתיות נשמרות, חישובים שעוד יש לבצע מסומנים, וכל מבחן דורש פרמטרים עקביים הן למנגנון והן לתוצרים שהוא חוזה. אחת-עשרה דרישות שהוסיפו המאמרים המאוחרים (R8–R18) מוצגות עם המבחנים ותנאי ההפרכה שלהן בחלקים C-I B.

מה המאמר מציג

ירח שנבנה כך חייב להראות באופן מסוים, והוא אכן נראה כך. החומר שלו חייב להיות החומר של כדור הארץ: איזוטופי החמצן מתאימים בתוך 5 ± 1 ppm (חלקים למיליון). הליבה שלו חייבת להיות קטנה, משום שהזרימה העולה נשאה סיליקט ובו מעט מתכת: לליבה הסייסמית רדיוס של 330 ק"מ, כ-1.4% מן המסה. הקרום שלו חייב להיות עבה יותר מול החיבור, במקום שבו כתר הכיפה נשא את הקליפה והצד הקר קפא ראשון: GRAIL מוצא שהצד הרחוק עבה יותר. הוא חייב לשמור את צד החיבור פונה אל כדור הארץ: הוא אכן שומר. הצד הרחוק שלו חייב היה להיסגר ולהישמר לפני שהצד המזון נרגע; הוא חייב לשאת מים, משום שההזנה נזקקה לחומרים נדיפים: תכלילי התכה — טיפות זעירות של מאגמה שנאטמו בתוך גבישים לפני ההתפרצות — מכילים 615–1,410 ppm. וקרום קל שרבה יותר בצד אחד חייב לדחוף את מרכז המסה לכיוון הצד השני: הוא מוסט 2 ק"מ לכיוון הצד הקרוב, וקרום בצורה שמודלה נותן 1.2–3.1 ק"מ עבור ניגודי צפיפות רגילים.

שבע תכונות, פיזור אחד של חומר. המאמר אינו סופר אותן כשבע הוכחות: הקרום, ההיסט, הימות וחלק מרשומת הגילים הם דבר אחד שנראה בארבע דרכים, וכל התאמה מוצגת יחד עם החישוב שעוד נדרש כדי להפוך אותה למבחן — מאזן איזוטופי של כמה מערכות, קצב העברת מתכת, התאמה משותפת של קרום והיסט, גילים ברי השוואה בשני הצדדים. החישובים האלה מפורטים, יחד עם מה שהיה מכשיל כל אחד מהם, ב-D.38. תכונה שמינית חדשה בגרסה הזאת: אם הקרום עלה כעור של כיפה, פני הירח מסודרים בשלושה אזורים קונצנטריים סביב מרכז הצד הקרוב — המגע, שנחשף אחרון; טבעת הבסיס שסביבו; והצד הרחוק, פני השטח הישנים של הכיפה — ומפת הגרדיאנטים של GRAIL מראה את הסדר הזה. לירח יש כל תכונה שהדרך הזאת דורשת; מה שנותר הוא להראות שמערכת אחת של פרמטרים

מייצרת את כולן יחד. שבע תכונות נוספות נובעות מן האגס של מאמר 3 — הכבידה העצמית שלו, החזרה שלו, ה-LLVP של האוקיינוס השקט, KREEP (רכיב בצד הקרוב העשיר באשלגן, ביסודות אדמה נדירים ובזרחן), הליבה כמד, היעדר חומר זר, וצפיפות מכתשים מוגברת בקטבים לפי גודל המכתש — והן מוצגות ב-C.6§. שלוש נוספות נובעות מן המאמרים שנסגרו אחרי האגס — 34 הימות כפתחים וכמקור החומר החוזר, שתי היציאות מתחת ל-South Pole–Aitken עם הכיפה מדרום להן, ושני ירחי מאדים שנורו מצינור אחד על קו המשווה — והן מוצגות ב-C.7§.

מבוא — מן המנגנון אל העקבות

לאחר שדרך הבנייה הוגדרה במאמרים 2–3, השאלה הבאה היא איזו רשומה היא הייתה צריכה להשאיר. תהליך שבונה ירח משאיר סימנים: בהרכב שלו, בפנים שלו, בעובי הקרום שלו, באופן שבו הוא פונה אל כוכב הלכת שלו, ובסדר שבו פני השטח שלו התקררו. תפקידו של מאמר 11 הוא לקשר את הפיזיקה לנתונים שאפשר לבדוק באופן בלתי תלוי. מאמר 10 הוא מבחן נפרד על מאדים; הצלחה או קושי שם אינם משנים בשקט את הפרמטרים של המקרה הארצי.

הכלי של המאמר הזה הוא הדרישה. כל דרישה מציינת תכונה שחייבת להתקיים אם הירח נוצר בדרך LEF, את המדידה שבודקת אותה, ואת התוצאה שהייתה פוסלת אותה. אנו אוספים דרישות ולא ציון מצטבר משתי סיבות. ראשית, התכונות אינן בלתי תלויות: קרום שהתעבה בצד אחד, מרכז מסה שהוסט לכיוון הצד השני, ימות שמרוכזות בצד הדק וחלק מרשומת הגילים הם, במודל, תוצאות של פיזור אחד של חומר; לחבר אותם כנקודות נפרדות פירושו לספור עובדה אחת כמה פעמים. שנית, ציון מאפשר להסכמות רבות לגבור על אי-הסכמה מכרעת, ואילו דרישה עם קריטריון הפרכה משלה נכשלת בזכות עצמה. לכן חלק B מדווח על התוצאה של כל מבחן בנפרד (B.9§).

סדר ההצגה הוא דרישה קודם ותצפית אחר כך. הסדר עוזר לקורא לבחון את ההיגיון, אך אינו הופך נתונים ידועים לחיזויים שנרשמו לפני שהיו ידועים. לכן מובחנים כאן שלושה סוגי תוצאה: תוצאה שנגזרה ממשוואות תחת הנחות מוגדרות; התאמה בדיעבד לתצפית; וחיזוי שעדיין לא נבדק. מדידה שנעשתה על ידי אחרים יכולה להיות גם אותה מדידה ששימשה לבחירת פרמטר במודל; במקרה כזה ההתאמה היא בדיקת עקביות, ולא תמיכה בלתי תלויה.

למאמר ארבעה חלקים. הטבלה שלהלן מציינת את השאלה שכל חלק מכריע: חלק A מציג את הדרישות, חלק B מעמת אותן עם מדידות, חלק C מוסיף את הסימנים שנובעים מן המאמרים המאוחרים, וחלק D אוסף את מה שהיה מפריך את המודל.

חלק	השאלה שהוא מכריע
A	מה בדיוק התרחיש דורש, ועל אילו הנחות נשענת כל דרישה?
B	מה נמדד, ומה אפשר להסיק מכל מדידה?
C	אילו סימנים נוספים ראויים לבחינה, בלי לספור אותם כתוצאות קיימות?
D	מה היה מכשיל את המודל, מה נותר פתוח ומה החידוש של העבודה?

חלק A — שבע הדרישות וההנחות שלהן

חלק A מציג מה דורשת דרך הבנייה של מודל LEF מן הירח. במודל, הירח נבנה בעודו מחובר לכדור הארץ: חומר עמוק הוזן כלפי מעלה אל גוף הולך וגדל, והקליפה החיצונית של כדור הארץ מעל אותו אזור עלתה יחד איתו כפני השטח של כיפה. אם כך נוצר הירח, הוא אינו יכול להיראות כמו כל גוף שהוא; הוא חייב לשאת עקבות מסוימים. כל אחד משבעת הסעיפים שלהלן מציין עקבה אחת כזאת (R1–R7), מסביר מדוע המודל זקוק לה, ומתאר איזה סוג של מדידה יבחן אותה. המדידות עצמן נבחנות בחלק B, באותו סדר, כך שלכל סעיף בחלק A יש סעיף מקביל בחלק B.

הבעיה

הגאומטריה של גוף מחובר אינה קובעת לבדה את ההרכב, את קצב ההתקררות או את כל פרטי הקרום. לגוף המחובר לכדור הארץ בחיבור רחב וחם יש צד קרוב וצד רחוק, אזור מוזן ואזור סגור; אבל כמה מתכת הוא נשא, באיזו מהירות קפא כל צד, או כמה מים נעו יחד עם ההזנה — כל אלה אינם נתונים מן הצורה בלבד. **הגישה:** לכל דרישה מצורפת ההנחה הפיזיקלית המשלימה הדרושה כדי לגזור אותה. כך הקורא רואה, לכל דרישה, מה נובע מן הגאומטריה ומה נובע מן ההנחה הנוספת, ומבחן שנכשל מצביע על החלק של המודל שהוא באמת נוגע בו.

שבע הדרישות מכסות שבעה סוגים של מדידה: איזוטופים (R1), גודל הליבה (R2), האסימטריה של הקרום (R3), הכיוון של הירח כלפי כדור הארץ (R4), סדר ההתקררות והשימור (R5), חומרים נדיפים כגון מים (R6), והקשר בין הקרום לבין מרכז המסה (R7).

A.1R1 — זיקה לחומר ארצי

מה היא דורשת. בתרחיש, החומר שבונה את הירח מקורו בכדור הארץ. לכן יש לדרוש התאמה למאגרים הארציים שמהם הגיע, לאחר שמביאים בחשבון התכה, הפרדה, אידי ובידול. "מאגר" כאן הוא גוף גדול של חומר בעל הרכב משלו — למשל המעטפת העמוקה של כדור הארץ, או הקליפה הסיאלית החיצונית שלו (השכבה העליונה הקלה, העשירה בצורן ובאלומיניום). מאחר שהמודל לוקח את חומר הירח משני מקורות ארציים כאלה, ההזנה העמוקה והקליפה העולה, הרכב הירח חייב להיות בר-השגה כתערובת של השניים.

מדוע המודל זקוק לה. זו התוצאה הישירה ביותר של הדרך: אם החומר הגיע מכדור הארץ, הוא חייב לשאת את טביעת האצבע הכימית של כדור הארץ. טביעת האצבע שמשתמשים בה לרוב היא מערכת יחסי האיזוטופים. איזוטופים הם צורות של אותו יסוד הנבדלות רק במספר הנייטרונים, ולכן במסה; היחסים ביניהם שונים מגוף אחד של מערכת השמש לאחר, וקשה לשנותם לאחר שגוף נוצר, ולכן הם משמשים תווית מוצא.

מה היא אינה דורשת. מקור משותף אינו מחייב שוויון בכל ריכוז של יסוד או בכל יחס איזוטופי. בפרט, איזוטופים רדיואקטיביים יכולים להתפתח באופן שונה במאגרים שנפרדו, ואיזוטופים תלויי-מסה יכולים לעבור התמיינות. איזוטופים רדיואקטיביים הם אלה הנוצרים בדעיכה רדיואקטיבית; שני מאגרים שנפרדו עם כמויות שונות של יסוד האם צוברים עם הזמן כמויות שונות של יסוד הבת, אף שהתחילו זהים. התמיינות תלוית-מסה היא מיון קל של איזוטופים קלים מכבדים במהלך אידי, התכה או התגבשות: האיזוטופים הקלים בורחים או נעים מעט ביתר קלות, כשם שהחלק הקל של נזל מתאדה ראשון. אף אחד משני ההבדלים אינו טוען נגד מקור משותף; שניהם צפויים לאחר התהליכים שהתרחיש כולל.

כיצד היא נבחנת. המבחן שואל אם מאזן של תרומות ממקורות ארציים יכול להסביר כמה מערכות איזוטופיות ואת ההרכב הכימי יחד. מדידת חמצן יחידה אינה מאמתת לבדה את המאזן כולו. ערך החמצן הוא ההתאמה היחידה המוכרת ביותר — ההפרש בין כדור הארץ לירח הוא 5 ± 1 ppm (B.1§) — אבל הדרישה מתקיימת רק כאשר תערובת אחת של שני המקורות הארציים, עם התהליכים המותרים שהופעלו עליה, מסבירה בבת אחת את החמצן, את המערכות האיזוטופיות האחרות ואת הכימיה הכוללת.

A.2R2 — ליבה מתכתית קטנה

מה היא דורשת. לירח יש ליבה מתכתית קטנה: הליבה הסייסמית מגיעה לרדיוס של כ-330 ק"מ, כ-1.4% ממסת הירח (B.2§), חלק קטן לגוף בגודלו. במודל, הירח הוזן בעיקר בחומר סיליקטי מלמטה, ובו רק מעט מתכת. ההעברה הפנימית חייבת לשאת חומר שמסוגל לספק את המתכת שבליבת הירח, בלי להעביר חלק מתכת גדול מן המותר. לדרישה יש אפוא שני צדדים: די מתכת כדי ליצור את הליבה הקיימת, ולא כל כך הרבה שהליבה תהיה גדולה מזו שנצפתה.

במה תלויה הכמות. הכמות תלויה בחלק המתכת במקור, בגודל הטיפות, בשקיעה היחסית, במהירות הזרימה ובמצב החמצון. במילים פשוטות: כמה מתכת חופשית הייתה בחומר המזין; כמה גדולות היו טיפות המתכת (טיפות גדולות וכבדות שוקעות חזרה דרך זרימה איטית, וקטנות נסחפות איתה, כשם שחול דק נשאר מרחף בנחל מהיר בעוד חצץ שוקע); כמה מהר נעה הזרימה כלפי מעלה לעומת מהירות השקיעה של הטיפות; ומצב החמצון, כלומר כמה ברזל היה כלוא כימית במינרלים במקום להיות נוכח כמתכת. נוכחות ברזל במקור אינה מבטיחה שטיפות מתכת יעלו, וברזל הקשור בסיליקטים אינו זהה למתכת חופשית: ברזל במינרל סיליקטי נע עם הסיליקט ואינו מצטרף לליבה מתכתית.

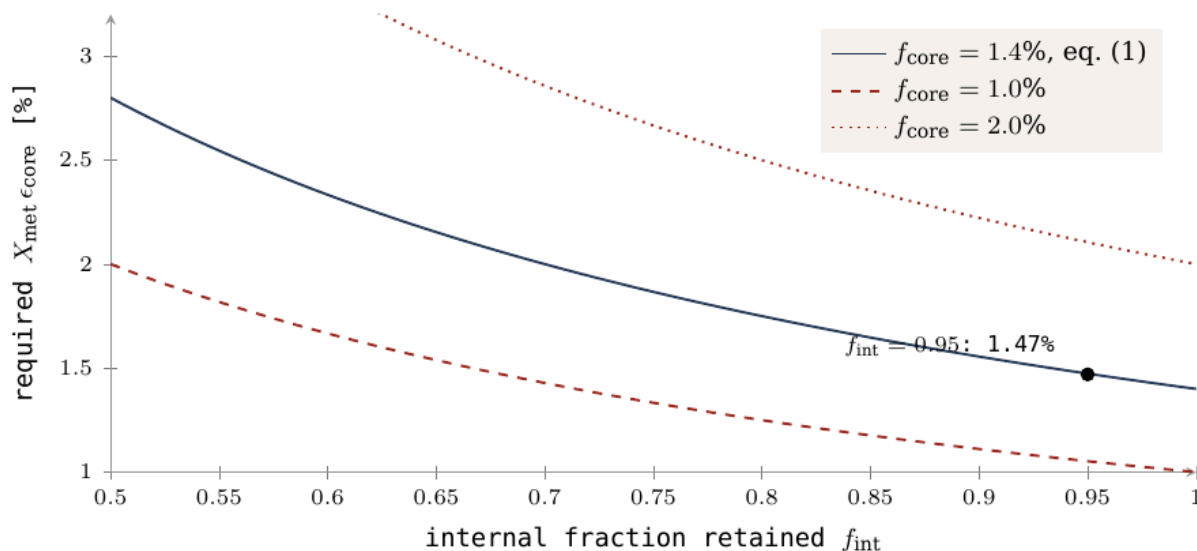
המאזן. אם f_{int} הוא החלק הפנימי שנשאר בירח, X_{met} חלק המתכת האפקטיבי בחומר הזה, ו- ϵ_{core} החלק ממנו שהגיע לליבה, אז במקרה הפשוט שבו תרומת המתכת מן הקליפה זניחה:

$$f_{\text{core}} = f_{\text{int}} X_{\text{met}} \epsilon_{\text{core}}.$$

משוואה (1) נקראת משמאל לימין כשרשרת של שלושה חלקים. מכלל הירח, חלק f_{int} הוא חומר עמוק(1) שסופק בהזנה; מן החומר הזה, חלק X_{met} הוא מתכת חופשית; ומן המתכת הזאת, חלק ϵ_{core} שקע והצטרף לליבה. המכפלה שלהם היא f_{core} , חלקה של הליבה במסת הירח. הקליפה מושמטת מחשבון המתכת משום שהקליפה הסיאלית החיצונית היא חומר קל שנשוא מעט מתכת חופשית.

זו דרישת מאזן, לא חישוב של יעילות הסחיפה (היעילות שבה הזרימה אספה מתכת ונשאה אותה). היא אינה אומרת כיצד נישאה המתכת; היא אומרת כמה ממנה חייב היה להגיע. למשל, חלק ליבה מאומץ של 1.4% ו- $f_{\text{int}} = 0.95$ — החומר העמוק של מאמר 3, 94–96% מן הירח — דורשים מכפלה $X_{\text{met}} \epsilon_{\text{core}} \simeq 1.47\%$ במילים: כאחוז וחצי מן החומר העמוק, כשסופרים רק את המתכת שהגיעה בפועל למרכז, חייב היה להיות מתכת. אם רק חלק מן המתכת שסופקה הגיע לליבה, החומר המזון חייב היה לשאת בהתאם יותר. התיאור "מעט מתכת" הופך בכך לכמות שמאמר 3 חייב להסביר.

איור 4 מציג את אותו מאזן על פני טווח של מקרים. הציר האופקי הוא החלק הפנימי f_{int} ; הציר האנכי הוא המכפלה $X_{\text{met}} \epsilon_{\text{core}}$ שהליבה דורשת. כל עקומה שייכת לגודל ליבה אחד: הקו הכחול-כהה הרציף ל-1.4%, המאומץ, והקווים האדומים המקווקו והמנוקד לליבות של 1.0% ו-2.0% התוחמות אותו. כל העקומות יורדות משמאל לימין: ככל שחלק גדול יותר מן הירח הוא חומר עמוק, כך כל יחידה ממנו צריכה לשאת פחות מתכת, והקטנת f_{int} בחצי מכפילה את המכפלה הנדרשת. הנקודה השחורה מסמנת את מקרה הייחוס של מאמר 3, $f_{\text{int}} = 0.95$ ו-1.47%. מאחר שהמודל מציב 94–96% מן הירח בחומר העמוק, המקרה שלו נמצא בקצה הימני של האיור, שם הדרישה הקטנה ביותר.



איור 4. הדרישה R2 כמספר: המכפלה של חלק המתכת האפקטיבי בחומר המזון ושל החלק ממנו שהגיע לליבה, הדרושה לבניית ליבה של 1.0–2.0% ממסת הירח, כפונקציה של החלק הפנימי של הירח. "מעט מתכת" הופך לכמות שמאמר 3 חייב להסביר.

כיצד היא נבחנת. המבחן הוא תחזית, מתוך ההעברה והבידול של מאמר 3, של טווח חלקי הליבה שהמנגנון מייצר, המוצבת לצד הליבה שנמדדה בסייסמולוגיה ירחית (B.2§). בידול כאן פירושו היפרדות של גוף לשכבות לפי צפיפות — מתכת כבדה שוקעת למרכז, וסיליקט קל נשאר מעליה.

A.3R3 — אסימטריה הקשורה לפתח

מה היא דורשת. הקרום של הירח עבה יותר בצד הרחוק מאשר בצד הקרוב. המודל דורש את האסימטריה הזאת, ודורש שהיא תהיה מסודרת סביב הפתח — החיבור שדרכו הזון הירח ושעליו ישב על כדור הארץ. הקרום חייב להיות דק סביב החיבור הישן ועבה מולו.

מדוע המודל זקוק לה. שני גורמים פועלים באותו כיוון. הראשון תרמי. חיבור חם בצד אחד והתקררות יעילה יותר בצד שמנגד מרמזים על התעבות גדולה יותר בצד הרחוק מן החיבור, כשם שהצד של סיר הרחוק מן הלהבה מתקרר ומתקשה ראשון. השני גאומטרי. מאמר 3 מוסיף את הגאומטריה: הצד הרחוק היה פני השטח של הכיפה ונשא את הקליפה לאורך כל הדרך, והתעבה פי שלושה כאשר פני השטח האלה נסגרו על חצי הכדור הרחוק; הצד הקרוב היה הבסיס: הטבעת שלו נשאה את הסיאל שעליו ישב הגוף, ונקלפה יחד איתו, ומרכזו, המגע, איבד את הסיאל הזה לחום והוחלק בידי החום והכבידה (מאמר 3, C.4a§). כדי לדמיין את הצד הרחוק, חשבו על בד הפרוש על כיפה ואחר כך נאסף סביב כדור: אותו בד מכסה עכשיו שטח קטן יותר, ולכן הוא מונח עבה יותר. הקליפה של כ-18 ק"מ שכיסתה את הכיפה נסגרה על חצי כדור אחד והתעבתה פי שלושה, לקרום הצד הרחוק של 50–60 ק"מ של מאמר 3. לצד הקרוב הייתה היסטוריה אחרת: הטבעת החיצונית שלו שמרה את הסיאל של פני כדור הארץ שעליו נח הגוף ונשאה אותו איתה כאשר הגוף נקלף, בעוד המגע המרכזי החם איבד את הסיאל הזה כליל.

העובי נובע משילוב של סגירה, עיוות וקפיאה, עם שימור מסה; אין לספור דחיסה כתוספת של מסה חדשה. כאשר הקליפה נאספת היא נעשית עבה יותר, אבל לא נוסף חומר: אותה מסה פרושה על שטח קטן יותר. לכן הצד הרחוק העבה חייב להיות מוסבר במסה של הקליפה שהייתה קיימת, ו-B.3§ מראה שכך הוא: הקליפה של הכיפה וקרום הצד הרחוק מתאימים זה לזה בטווח של כ-10% (7% בגרסה קודמת של החישוב).

מה עוד היא מניחה. הסקת קרום עבה בצד הרחוק דורשת גם שערבוב, העברה פנימית, שינויי הרכב, והיווצרות מכתשים מאוחרת מחומר חוזר והיווצרות אגנים לא ימחקו את האסימטריה. במילים אחרות, מה שהכיפה הנסגרת יצרה חייב היה לשרוד את מה שבא אחריה. צורת "קסדה" חלקה היא הקירוב המשמש לרכיב בעל אורך הגל הארוך: הקרום מתואר כעבה ביותר בקוטב אחד של הגוף ומתדקק בהדרגה לכיוון הקוטב שמנגד, כמו קסדה עבה יותר בכתר מאשר בשוליים, ומשווים רק את המגמה בקנה מידה גדול, לא כל פרט מקומי (משוואה (3) B.3§ נותנת את הצורה הזאת). אין גזירה המחייבת שכל נקודה מקומית תהיה עבה יותר מזו שלפניה, או שמפה גאולוגית מורכבת תכיל בדיוק מקסימום אחד. אגנים, ימות והתעבויות מקומיות צפויים לשבור את העקומה החלקה; הדרישה נוגעת במגמה הכוללת.

כיצד היא נבחנת. המבחן משתמש במפות של עובי הקרום הנגזרות מכבידה ומטופוגרפיה, בעיקר משימת GRAIL (B.3§ ואיור 5): הקרום חייב להתעבות עם המרחק הזוויתי מן המגע הישן בצד הקרוב, וקרום הצד הרחוק חייב להכיל את המסה של קליפת הכיפה.

A.4R4 — כיוון בזמן החיבור

מה היא דורשת. הירח מפנה תמיד את אותם פנים אל כדור הארץ — הסיבוב שלו סינכרוני, סיבוב אחד סביב צירו לכל הקפה. המודל דורש שהפנים האלה יהיו קשורים לצד החיבור: הצד שבו היה הירח מחובר הוא הצד הפונה אל כדור הארץ.

מדוע המודל זקוק לה. גוף שהחיבור שלו מונע סיבוב יחסי חופשי שומר את צד החיבור שלו מופנה אל גוף האם. הוא עדיין מסתובב במרחב יחד עם המערכת. קל להחמיץ את ההבחנה הזאת. חשבו על שני רקדנים האוחזים ידיים ומסתובבים יחד: כל אחד פונה תמיד אל השני, ובכל זאת שניהם מסתובבים ביחס לחדר. הירח המחובר נמצא באותו מצב: ביחס לכדור הארץ הוא אינו מסתובב, אבל ביחס לכוכבים הרחוקים הוא מסתובב פעם אחת עם כל סיבוב של המערכת. במצב מעגלי מתאים, הכיוון הזה יכול לספק מצב התחלתי סינכרוני לשחרור. ברגע השחרור, הירח כבר מראה לכדור הארץ פנים אחדים, והוא מסתובב פעם אחת בכל הקפה, וזה בדיוק מה שסיבוב סינכרוני פירושו.

מה עוד צריך לפתור. לאחר הניתוק, יש לפתור את המומנטים הגאותיים, את הליברציה ואת שינויי הצורה. מומנטים גאותיים הם כוחות הפיתול הנוצרים משום שכדור הארץ מושך בחוזקה רבה יותר את החלק הקרוב של הירח מאשר את חלקו הרחוק; ליברציה היא ההתנדנדות הקלה של הירח, שבזכותה צופה על כדור הארץ רואה עם הזמן מעט יותר ממחצית פני השטח שלו; שינויי צורה הם שינויים בצורת הירח, המשנים את האופן שבו הוא מגיב לגאות. המסלול הדינמי הנדרש חייב לקשור את צד החיבור לשעבר לצד הפונה היום אל כדור הארץ. הניסוח "גוף מחובר אינו יכול להסתובב" מוחלף אפוא בהגדרה של סיבוב יחסי: הגוף המחובר כן מסתובב, אבל באותו קצב כמו המערכת, ולכן הוא אינו מסתובב ביחס לגוף האם. מאמר 4 עוסק בהתפתחות שלאחר השחרור.

כיצד היא נבחנת. המבחן מעביר את הצורה, הסיבוב והתנע הזוויתי בעת השחרור ממאמר 2 אל החישוב המסלולי של מאמר 4, ובודק שצד החיבור נשאר הצד הפונה אל כדור הארץ, או חוזר להיות הצד הזה (B.4§). הסינכרוניות של היום לבדה אינה המבחן, משום שהתפתחות גאותית יכולה לייצר אותה גם לאחר דרכי היווצרות אחרות.

A.5R5 — סדר מוגדר של התקררות ושימור

מה היא דורשת. המודל דורש שהצד הרחוק, שמול החיבור, התייצב והתחיל לשמור את התייעוד שלו לפני שהאזור המזון, הסמוך לחיבור, עשה זאת.

מדוע המודל זקוק לה. הסגירה של המעטה שמול החיבור מאפשרת שימור מוקדם יותר שם, בעוד אזור ההזנה ממשיך להתחמם ולהשתנות. ברגע שהכיפה נסגרה על חצי הכדור הרחוק, פני השטח האלה כבר לא התחדשו:

הם התקררו, התקשחו והתחילו לשמור את המכתשים שנחתו עליהם. הצד הקרוב, מעל ההזנה, עדיין התחמם ועובד מחדש, ולכן התייעוד שלו התחיל מאוחר יותר. הדרישה נוגעת בזמן שבו יחידות מסוימות התייצבו ושימרו תיעוד. אין משתמע ממנה שכל דגימה מן הצד הרחוק עתיקה מכל דגימה מן הצד הקרוב. "יחידה" כאן היא אזור של קרום בעל מוצא אחד והיסטוריה אחת, כגון מישור של רמות או קרקעית של אגן.

ארבעה גילים שונים. יש לשמור על הבחנה בין גיל חומר הקליפה לפני שעלה, גיל הקפיאה של קרום חדש, גיל הפגיעה וגיל המילוי הבזלתי. אלה ארבעה שעונים שונים. הראשון הוא גיל החומר עצמו, שבמודל נוצר בקליפה של כדור הארץ לפני שהכיפה עלתה. השני הוא הרגע שבו קרום חדש התמצק. השלישי הוא מה שהספרות מכנה "גיל פגיעה" (impact age): הרגע שבו אירוע יוצר מכתש התיך חלק מקרום קיים או איפס אותו. הרביעי הוא גיל הלבנה הכהה שמילאה מאוחר יותר את האגנים. דגימה יכולה לשאת שיעון אחד ולא את האחרים, ולכן השוואה של שיעון מן הצד הרחוק לשיעון מסוג אחר מן הצד הקרוב אינה אומרת דבר על סדר הסגירה. התחזית החזקה "כל קרום הצד הקרוב נוצר מאוחר יותר" אינה נובעת אפוא מן התרחיש המשולב. התחזית הצרה יותר נוגעת בסדר הסגירה והשימור בין יחידות בעלות מוצא ותהליכי היווצרות דומים.

כיצד היא נבחנת. המבחן מזהה יחידות של סגירה ושימור בשני הצדדים, מתארך תהליכים דומים, ושואל אם הסדר שורד לאחר שמפרידים את האירועים יוצרי המכתשים ואת מילוי הלבנה (B.5§) מציב את ארבעת השעונים זה לצד זה).

A.6R6 — חומרים נדיפים בכמות ובמצב שהמנגנון צריך

מה היא דורשת. חומרים נדיפים הם חומרים שהופכים בקלות לגז, בעיקר מים, יחד עם פחמן דו-חמצני ותרבות דומות. במאמר 3 הם עוזרים להזנה לפעול. אם חומרים נדיפים נדרשים להפחתת צפיפות, לשינוי הראולוגיה או ללחץ ההזנה, המנגנון חייב לפעול בריכוזים ובמצבי פאזה אפשריים פיזיקליים של חומרים נדיפים לכל אורך המסלול. הם יכולים להפחית את צפיפות החומר העמוק, כך שיהיה קל יותר ויעלה; הם משנים את הראולוגיה שלו — באיזו קלות הוא זורם ומתעוות — כשם שמים גורמים לחומר מותך וכמעט מותך לזרום ביתר קלות; ובצורת גז הם מוסיפים לחץ הדוחף את ההזנה כלפי מעלה. כל אחד מן התפקידים האלה צריך כמות מסוימת של חומרים נדיפים, במצב מסוים (מומסים בהתכה, כנוזל צפוף, או כגז), בכל עומק לאורך המסלול.

מה אינו מספק אותה. נוכחות מים במקום כלשהו בירח אינה מספקת את התנאי הזה. מציאת מים בדגימות ירחיות מראה שחומרים נדיפים קיימים; היא אינה מראה שהיו מהם די, במצב הנכון, במקום שבו ההזנה נזקקה להם. גם ההנחה של מעטה אדים קדום אינה מתירה להציב בועות מדוללות בכל עומק. בעומק רב הלחץ שומר את החומרים הנדיפים מומסים או דוחס אותם מאוד, ולכן מצב החומרים הנדיפים בכל עומק חייב לנבוע מן הלחץ, הטמפרטורה וההרכב, ולא להיבחר כך שיתאים למנגנון.

תנאי החומרים הנדיפים שמאמר 3 דורש חייבים לחפוף לאלה שמודל גאוכימי ותרמודינמי מתיר. שני טווחים חייבים להיפגש: הטווח שהמנגנון צריך, והטווח שהכימיה וחוקי החום והלחץ מתירים. יש להביא בחשבון אובדן, המסה, השלכה והעברה בין מאגרים: חלק מן המים בורח לחלל, חלק מתמוסס בהתכה, חלק יוצא עם חומר מושלך, וחלק עובר ממאגר אחד לאחר, כך שהמים הנמדדים היום הם מה שנשאר לאחר כל השלבים האלה.

כיצד היא נבחנת. המבחן גוזר ממאמר 3 את הריכוז המינימלי ואת מצב הפאזה לאורך מסלול ההזנה, ומעביר אותם דרך מודל של אובדן ובידול אל הריכוזים הנמדדים בדגימות ירחיות, כגון ppm 1,410–615 מים בתכלילי התכה (B.6§).

A.7R7 — התפלגות הקרום ומרכז המסה

מה היא דורשת. מרכז המסה של הירח — הנקודה שבה המסה שלו מאוזנת — אינו נמצא במרכז צורתו החיצונית; הוא נמצא בסדר גודל של 2 ק"מ לכיוון הצד הקרוב (B.7§). המודל דורש שהקרום שלו, עבה בצד

הרחוק ודק בצד הקרוב, ייצור היסט מן הסוג הזה, בכיוון הזה.

מדוע היא נובעת. בגוף בעל צורה חיצונית נתונה, החלפת מעטפת צפופה בקרום קל בצד הרחוק יוצרת שם חוסר במסה. הקרום קל מן המעטפת שמתחתיו; במקום שבו הקרום עבה, חומר קל תופס מקום שמעטפת צפופה הייתה ממלאת אחרת. לכן הצד הרחוק מכיל פחות מסה מן הצד הקרוב בתוך אותו מתאר. דמיינו כדור שבצדו האחד משובץ טלאי עבה של שעם: נקודת האיזון שלו נמצאת לכיוון הצד שמנגד. התרומה של הקרום למרכז המסה מצביעה לכיוון הצד הדק. זו תוצאה כבידתית בתנאים מוגדרים.

מה עוד נכנס. מרכז המסה הכולל כולל גם טופוגרפיה, מעטפת, ליבה, חדירות מגנטיות ומילויי אגנים. טופוגרפיה היא גובה פני השטח; חדירות מגנטיות הן גופים של התכה שהתמצקו בתוך הקרום; מילויי אגנים הם הלבות הצפופות שמילאו את האגנים הגדולים. כל אחד מהם מזיז את נקודת האיזון בשיעור משלו. לכן הסימן של תרומת הקרום אינו בהכרח הסימן של ההיסט הכולל. הקרום דוחף את מרכז המסה לכיוון הצד הקרוב, אבל הדרישה מתקיימת רק אם סכום כל התרומות מצביע לשם.

כיצד היא נבחנת. המבחן חייב להשתמש באותו מודל צפיפות כדי לחשב גם את העובי וגם את ההיסט, בלי להתאים צפיפות חדשה רק כדי לקבל את התוצאה הרצויה. עובי הקרום אינו נמדד ישירות; הוא מחושב מן הכבידה תחת צפיפות מונחת של קרום ומעטפת. אילו שימשה צפיפות אחת לקבלת העובי ואחרת לקבלת ההיסט, ההתאמה הייתה מיוצרת. עם מודל צפיפות יחיד, B.7§ מחשב היסט של 1.24–3.11 ק"מ להפרשי צפיפות של 300–750 ק"ג/מ"ק, טווח הכולל את סדר הגודל הנצפה; זהו טווח רגישות מחושב, לא תחזית עצמאית של ההיסט.

עם R7 שבע הדרישות שלמות. כל אחת מקשרת עקבה על הירח לשלב של הדרך: R1 למקור, R2 להזנה, R3 ו-R7 לכיפה הנסגרת ולצורת הקרום, R4 לחיבור, R5 לסדר הסגירה, ו-R6 לתנאים שההזנה נזקקה להם. חלק B מעמיד עכשיו כל אחת מהן מול המדידות.

חלק B — שבע הדרישות מול המדידות

חלק A קבע כיצד חייב להיראות ירח שנבנה בהרמה מכדור הארץ: שבע דרישות, וליד כל אחת ההנחה הפיזיקלית שמולידה אותה. חלק B מעמיד עכשיו כל דרישה ליד המדידה הנוגעת לה. בכל דרישה ימצא הקורא אותם ארבעה צעדים: מה נמדד, כיצד המודל מסביר זאת, המבחן שיכריע בשאלה, והתוצאה שתיחשב כישלון. סעיפים B.1–B.6 עוסקים באיזוטופים, בליבה, בקרום ובימות, בסיבוב הסינכרוני, בשעונים של התיעוד הירחי ובמים; B.7 ו-B.8 ממשיכים במרכז המסה ובאזורי החשיפה.

הבעיה

תכונה שנמצאת על הירח יכולה להתיישב עם כמה מנגנונים. ליבה קטנה, למשל, או צד רחוק עבה, יכולות להיווצר ביותר מדרך אחת, ולכן מציאתן אינה מצביעה כשלעצמה על LEF דווקא. **הגישה:** בכל מבחן מופרדים התצפית, ההסבר של המודל, וכוח ההבחנה ביניהם. "מתיישב" פירושו התאמה: התצפית תואמת את מה שהמודל דורש. "פתוח" פירושו שההשוואה הנדרשת טרם נעשתה: החישוב שיהפוך את ההתאמה למבחן מכריע מוגדר בשמו, אבל עדיין לא בוצע. "נכשל" שמור לסתירה בתנאים שהוגדרו. שלוש המילים האלה משמשות במובן המדויק הזה לאורך כל המאמר.

B.1R1 — מה מלמד הדמיון האיזוטופי

השאלה שסעיף זה עונה עליה היא אם הירח עשוי מן החומר של כדור הארץ, כפי שהמודל דורש (R1). החמצן הוא העד הבודד הטוב ביותר. יש לו שלושה איזוטופים יציבים — צורות של אותו יסוד הנבדלות זו מזו רק במסה: O^{16} , O^{17} ו- O^{18} . תהליכים רגילים כמו התכה, אידי והתגבשות ממיינים את האיזוטופים לפי המסה, והם משנים את היחס O^{17}/O^{16} בערך במחצית מן השינוי ביחס O^{18}/O^{16} , משום שהפרש המסות קטן בחצי. הגודל $\Delta^{17}O$ מודד כמה רחוקה דגימה מן הקו התלוי-מסה הזה. עיבוד בתוך גוף אחד אינו מזיז אותו, ולכן $\Delta^{17}O$ משמש טביעת אצבע של המאגר שממנו בא החומר. לגופים שונים במערכת השמש, כמו מאדים ורוב קבוצות המטאוריטים, יש טביעות אצבע שונות בבירור.

Young ועמיתיו דיווחו על הפרש חמצן בין כדור הארץ לירח:

$$\Delta^{17}O_{L-E} = -1 \pm 5 \text{ ppm}, \quad 2SE.$$

במילים: טביעת האצבע הירחית פחות זו הארצית היא -1 חלקים למיליון, עם אי-ודאות של ± 5 חלקים למיליון (2) בשתי שגיאות תקן ($2SE$, הטווח המקובל שבו הערך האמיתי נמצא בביטחון גבוה). ppm הוא חלק אחד למיליון של היחס. ההפרש הוא אפוא אפס בתוך גבולות המדידה: ברזולוציה של כמה חלקים למיליון, הירח וכדור הארץ נושאים אותו חמצן.

זהו דמיון ברזולוציה של אותה מדידה [S1]. המספר 5 ppm הוא אי-ודאות מדווחת, לא סף פיזיקלי שנגזר מ-LEF לכל יסוד: מדידה עתידית ברזולוציה עדינה יותר עוד עשויה למצוא הפרש קטן, ויסודות אחרים יש לבדוק כל אחד בתנאים. עבור LEF ההתאמה היא מה שהתרחיש חוזה ישירות, שכן החומר של הירח בא מכדור הארץ. עבור מודל הפגיעה של אחרים, שבו רוב הירח היה בא מן הגוף הפוגע, אותה התאמה דורשת ערבוב חזק בין שני הגופים. המחברים עצמם דנו בערבוב בזמן פגיעת ענק, ולכן הנתון אינו מבחין כשלעצמו בין דרך מחוברת לבין דרך של פגיעה מעורבת (Young et al., 2016). תוצאת החמצן היא אפוא התאמה הכרחית עבור LEF, ומה שהופך אותה למבחן מבחין הוא המאזן שלהלן.

מבחן: לחשב את הרכב התוצר ממאגרים ארציים מוגדרים, ולבדוק אותו מול כמה מערכות איזוטופיות בדגימות שונות, עם שגיאות המדידה והשונות בין המאגרים. בפועל: לנקוב במקורות הארציים (המאגר העמוק והקליפה הסיאלית של מאמר 3), לערבב אותם ביחסים שהמודל נותן, להביא בחשבון את האובדנים בהתכה ובאידוי, ולהשוות את התוצאה לחמצן, וגם למערכות איזוטופיות אחרות, בכמה דגימות ירחיות בבת אחת. **כישלון:** שום צירוף של מקורות ארציים ותהליכים מותרים אינו מסביר את הנתונים יחד. **מצב:** ההתאמה האיזוטופית חשובה, אבל מאזן רב-מערכתי של LEF עדיין פתוח.

B.2.R2 — הליבה היא יעד כמותי להובלה

לירח יש ליבה מתכתית, והיא קטנה. הדבר חשוב ל-LEF משום שכל חלק מן המתכת של הירח היה צריך להיות מובל למעלה מכדור הארץ בידי ההזנה. גודל הליבה הוא אפוא מדד לכמות המתכת שההובלה סיפקה, וגודל שנמדד הופך ליעד שהמנגנון חייב לפגוע בו.

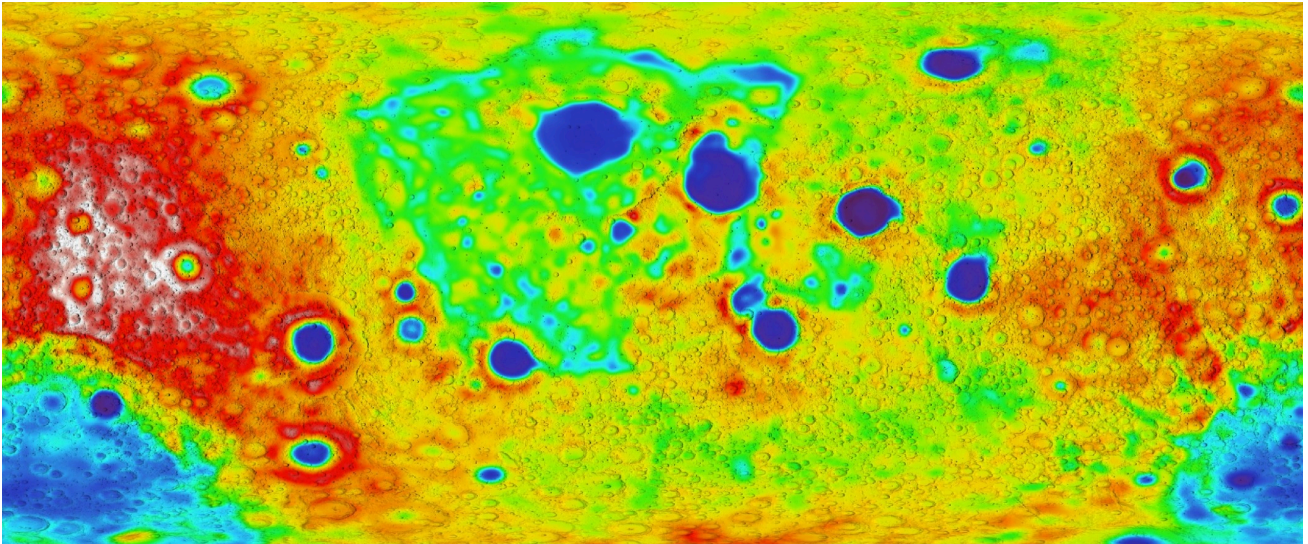
הליבה נמדדת בסייסמולוגיה. הסייסמומטרים שהשאירו משימות Apollo רשמו רעידות ירח במשך שנים, והאופן שבו הגלים מוחזרים ומואטים בעומק חושף את השכבות. המודל הסייסמי של Weber ועמיתיו כולל ליבה פנימית ברדיוס של כ-240 ק"מ וגבול ליבה נזולית ברדיוס של כ-330 ק"מ [S2]. הרדיוסים האלה נמדדים ממרכז הירח; הם אינם שני עוביי שכבות שיש לחבר: כדור פנימי מוצק של 240 ק"מ יושב בתוך מעטה נזולי ששפתו החיצונית ב-330 ק"מ, מתחת לירח שרדיוסו 1,737.4 ק"מ. חלק המסה תלוי גם בצפיפות ובמבנה; הערך 1.4% נשמר כאן כערך השוואה מן המקור, לא כמדידה עצמאית מדויקת. לשם השוואה, ליבת המתכת של כדור הארץ עצמו גדולה הרבה יותר באופן יחסי; הירח הוא גוף דל במתכת.

משוואה (1) של חלק A הופכת זאת למאזן: חלק הליבה שווה לחלק הפנימי של הירח, כפול חלק המתכת האפקטיבי בחומר המזון, כפול החלק מן המתכת הזאת שהגיע אל הליבה. עם $f_{\text{int}} = 0.95$, ליבה של 1.4% דורשת שהמכפלה $X_{\text{met}} \epsilon_{\text{core}}$ תהיה קרובה ל-1.47% (איור 4). בכך מגדירה משוואה (1) דרישה ממאמר 3: המנגנון חייב להסביר את קצב אספקת המתכת ואת ההפרדה שלה לאחר מכן. ליבה קטנה מתיישבת עם העדפה של סיליקטים — זרם עולה שנשא בעיקר חומר סיליקטי קל ומעט מתכת בתוכו — אבל אינה מוכיחה שמקור ההזנה שכן מתחת לליבה ארצית שעוד לא התארגנה. **מבחן:** חיזוי של טווח f_{core} מן ההובלה ומן ההתמיינות, כלומר מכמות המתכת שהזרם יכול היה לגרוף איתו ומן החלק ממנה ששקע אחר כך אל המרכז. **כישלון:** כל טווחי הגריפה הנתמכים נותנים ליבה מחוץ לטווח שנתוני הפנים מתירים. **מצב:** תכונת היעד קיימת; מנגנון העברתה עדיין אינו סגור כמותית.

B.3.R3 — הקרום, הימות והמסה שהגיעה מבחון

המודל דורש שהקרום יהיה עבה יותר בצד הרחוק מן החיבור (R3). סעיף זה קורא את הקרום שנמדד, כותב את הצורה הצפויה כנוסחה פשוטה, ואחר כך בודק אם לקליפה שנישאה על הכיפה של מאמר 3 יש המסה הנכונה כדי לבנות את הקרום של הצד הרחוק.

הקרום אינו נמדד ישירות; מסיקים אותו מן הכבידה. שתי חלליות GRAIL טסו זו אחרי זו סביב הירח ומדדו את המרחק המשתנה ביניהן; כל עודף או חוסר של מסה מתחת משך תחילה את החללית המובילה, ואחריה את הנגררת. בשילוב עם גובהי פני השטח שמד הגובהה הלייזרי LOLA מדד, אפשר לחסר את הכבידה של הטופוגרפיה הנראית. מה שנשאר מיוחס לתבליט של הגבול בין הקרום הקל למעטפת הצפופה יותר שמתחתיו. כדי להמיר את התבליט הזה לעובי יש לבחור צפיפות קרום ולקבע את העובי בנקודה אחת, מן הנתונים הסייסמיים של Apollo. נתוני GRAIL תומכים באסימטריה רחבת היקף של הקרום ובמודלים עם עובי ממוצע גלובלי של 34–43 ק"מ, בכפוף למודל הצפיפות ולעוגן הסייסמי [S3]; הפיזור של הממוצע משקף את שתי הבחירות האלה. אין לזהות זאת עם מדידה של 30 ק"מ בכל הצד הקרוב ו-60 בכל הצד הרחוק". המספרים האלה משמשים להלן כדוגמה גאומטרית בלבד (איור 5).



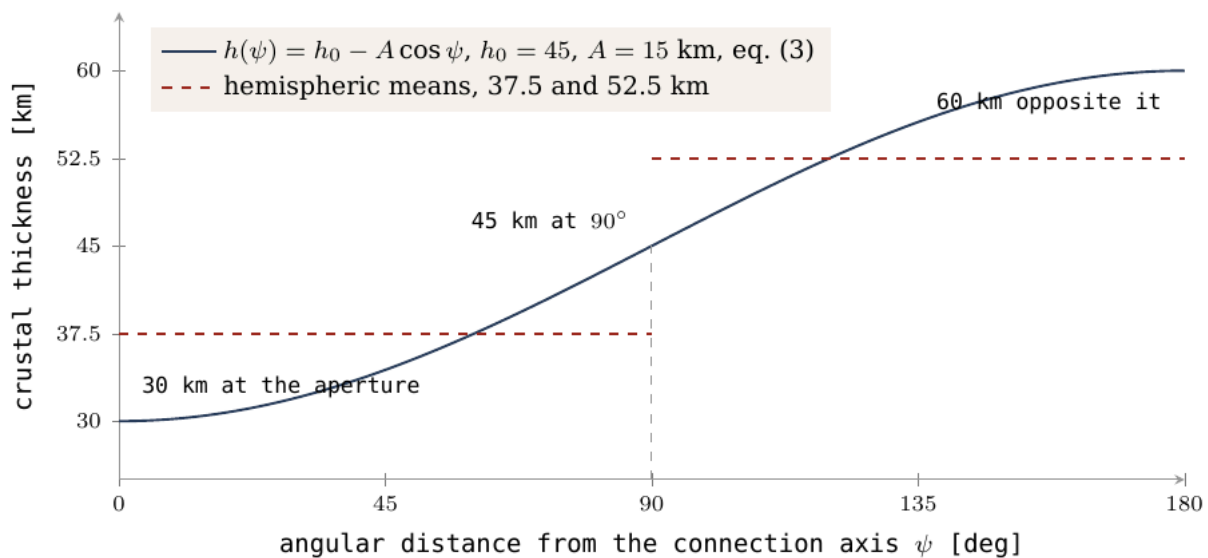
איור 5. עובי הקרום של הירח מכבידת GRAIL ומטופוגרפיית LOLA, היטל גלילי שמרכזו ב- 0° מזרח, קווי רוחב $\pm 75^\circ$ (הצד הקרוב במרכז, הצד הרחוק בשני השוליים). כחול: קרום דק מתחת לאגנים של הצד הקרוב; אדום ולבן: הרמות העבות של הצד הרחוק. הצד הרחוק עבה בכ-10 ק"מ בין מרכז הצד הקרוב לצד הרחוק, ובכ-8 ק"מ בממוצעים של חצאי הכדור (מאמר 11, B.8§): במודל, הקליפה של הכיפה התעבתה פי שלושה; הצד הקרוב הוא הסיאל המקולף של הבסיס, דק ביותר מתחת לימות, הפתחים. קרדיט: NASA/JPL-Caltech/MIT; Zuber et al) GRAIL של הקרום של (NASA/GSFC/Arizona State University); עובי הקרום של (al. 2013).

כיצד לקרוא את איור 5: מרכז המפה הוא הפנים שהירח מפנה אל כדור הארץ, והשוליים השמאליים והימניים הם הצד הרחוק. הכתמים הכחולים במרכז הם קרום דק מתחת לאגנים הגדולים של הצד הקרוב; הצבעים החמים לעבר השוליים הם הרמות העבות של הצד הרחוק. ההתעבות מן המרכז אל השוליים היא הדפוס ש-R3 דורשת.

כדי להשוות מודל למפה כזאת צריך את הצורה הצפויה כנוסחה. נגדיר את ψ כמרחק הזוויתי מציר החיבור 0° במרכז החיבור לשעבר, 90° על החגורה שבמחצית הדרך מסביב, 180° בנקודה שממול — וניקח לצורך הבדיקה את הקירוב:

$$h(\psi) = h_0 - A \cos \psi, \quad A > 0.$$

כאן h הוא עובי הקרום, h_0 העובי על החגורה ב- 90° , ו- A משרעת האסימטריה. משום ש- $\cos \psi$ נע מ-1+ (3) בחיבור ל-1- ממולו, הקרום דק ביותר, $h_0 - A$, בחיבור, ועבה ביותר, $h_0 + A$, בצד הרחוק: "קסדה" חלקה עם קוטב דק אחד וקוטב עבה אחד. ערכי קצה של 30 ו-60 ק"מ נותנים $h_0 = 45$ ק"מ ו- $A = 15$ ק"מ; בחגורה ב- 90° מתקבלים 45 ק"מ. אלה ערכי קצה, לא ממוצעים של חצאי כדור: הממוצעים בדוגמה הם 37.5 ו-52.5 ק"מ. הסיבה גאומטרית: בממוצע על פני השטח של חצי כדור, ל- $\cos \psi$ יש הערך חצי, ולכן הממוצעים של חצאי הכדור הם $45 \pm 15/2$. הצבת ממוצעים כערכי קצה משנה את המשרעת של המודל — קריאת 37.5 ו-52.5 ק"מ כערכי קצה הייתה נותנת $A = 7.5$ ק"מ, מחצית המשרעת של הדוגמה.



איור 1. מודל הקרום באורך הגל הארוך של B.3§. ערכי קצה של 30 ו-60 ק"מ נותנים $h_0 = 45$ ו- $A = 15$ ק"מ; הממוצעים של חצאי הכדור הם 37.5 ו-52.5 ק"מ, לא ערכי הקצה. הממוצע הגלובלי של GRAIL, 34–43 ק"מ, הוא אילוץ על h_0 , לא על A .

איור 1 משרטט את משוואה (3). העקומה הכחולה הכהה עולה מ-30 ק"מ בפתח ל-60 ק"מ ממולו; המדרגות האדומות המקווקוות הן הממוצעים על כל מחצית, והן נמצאות הרחק בתוך ערכי הקצה. הממוצע הגלובלי ש-GRAIL מדדה קובע את הרמה הכללית של העקומה (h_0), אבל אינו אומר דבר על מידת התלילות שבה היא עולה (A); התלילות צריכה לבוא מן המפה עצמה.

מבחן מפה: לקבע את הציר, את הרזולוציה ואת מסכת האגנים לפני ההתאמה; לחשב ממוצעים משוקללי שטח בחגורות; להעריך את A ואת השאריות על פני מודלי צפיפות שונים. מסכת אגנים מוציאה את האגנים הגדולים מן הממוצעים, כדי שההידקקות המקומית שלהם לא תיחשב בטעות למגמה הגלובלית; שקלול השטח נותן לכל חגורה את חלקה האמיתי בפני השטח, משום שהחגורות הסמוכות לציר קטנות. יש לבדוק את הרגישות גם בלי המסכה. שחזור של חומר שנחפר באגנים אינו יכול להיות מוכתב מראש בידי הצורה שרוצים למצוא. ציר שנבחר מן המפה עצמה הוא פרמטר מותאם, ויש לבחון אותו על נתונים נפרדים; אחרת המבחן היה מוצא את הדפוס שאליו כוונן. סעיף B.8 מבצע את מבחן החגורות הזה על הגאומטריה של אזורי החשיפה.

הימות — המישורים הכהים והחלקים של הצד הקרוב — מרוכזים בצד הקרוב, אבל הכיסוי הבזלתי מושפע גם מייצור מאגמה, ממקורות חום ומשברים. במודל, ים הוא פתח מעל כיפת הזנה, שדרכו הגיעה הלבה המאוחרת אל פני השטח. מבני הגבול של Procellarum פורשו על בסיס GRAIL כמערכת של בקעים וחדירות מאגמטיות בגאומטריה דמוית מלבן, הקשורה למאמצים תרמיים [S4]. המחקר הזה אינו מזהה צוואר חיבור קדום לכדור הארץ (Andrews-Hanna et al., 2014). גם המודל אינו דורש צוואר כזה: ב-LEF לא היה צוואר; הגוף התקלף מן הבסיס שעליו ישב (מאמר 3, C.4a§), והפתחים הם מה שהצד הקרוב מראה במקומו.

ב-LEF האסימטריה היא הקליפה של הכיפה שהתעבתה בסגירה, עם חימום לא אחיד: הצד הרחוק היה פני השטח של הכיפה ונשא את הקליפה, שהתעבתה כשפני השטח האלה נסגרו על חצי הכדור הרחוק, ואילו צד החיבור נשמר חם. הסבר מוקדם יותר, המבוסס על אור הארץ (Earthshine), מציע גם הוא קשר בין כדור ארץ חם לבין צד רחוק קר ועבה יותר של הירח [S5]: לפיו, כדור הארץ הצעיר והזוהר שמר את הצד הקרוב חם בזמן שהצד הרחוק התקרר, וחומר יוצר-קרום התעבה בעדיפות על הצד הקר. שני מנגנונים שונים חוזים אפוא את אותו כיוון כללי. האסימטריה הכללית היא לכן התאמה, ואילו דפוסי העיוות והמסה עשויים לספק מבחן מבחן (Roy et al., 2014).

בדיקת מאזן נוספת. ההתעבות בצד הרחוק חייבת לבוא ממקום כלשהו: דחיסה אינה יוצרת מסה. השאלה היא אם הקליפה שעלתה על הכיפה של מאמר 3 מכילה די חומר כדי לבנות את הקרום של הצד הרחוק. לפי הכיפה של מאמר 3, קליפה בעובי $h_s = 18$ ק"מ ובצפיפות 2,800 ק"ג/מ"ק על פני שטח של חצי כדור ברדיוס 3,000 ק"מ, $A_s = 2\pi R_h^2$:

$$M_{\text{shell}} = \rho_s h_s A_s = 2.85 \times 10^{21} \text{ kg} = 3.9\% \text{ of } M_L.$$

במילים: מסת הקליפה היא הצפיפות שלה כפול העובי שלה כפול השטח שהיא מכסה, פני השטח המעוקלים (4) של הכיפה החצי-כדורית ($2\pi R_h^2$), מחצית השטח של כדור שלם באותו רדיוס). התוצאה היא כארבעה אחוזים ממסת הירח, M_L .

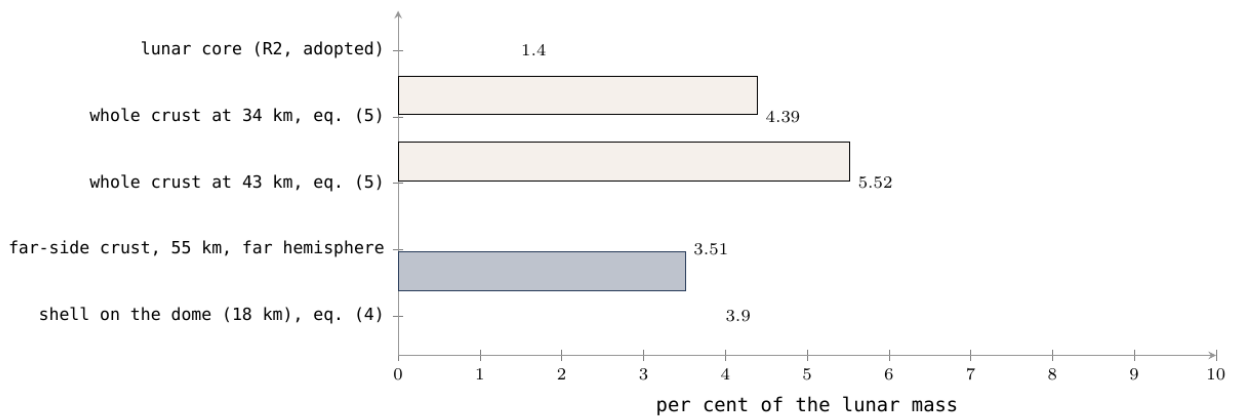
להשוואת סדרי גודל בלבד, קרום כדורי של היום, ברדיוס חיצוני $R_L = 1737.4$ ק"מ, בצפיפות מאומצת של 2,550 ק"ג/מ"ק ובעובי אחיד h , מכיל:

$$M_{\text{crust}} = \frac{4\pi\rho_c}{3} [R_L^3 - (R_L - h)^3].$$

משוואה (5) היא הנפח של קליפה כדורית — נפח הירח כולו פחות נפח הכדור שבתוך הקרום — כפול צפיפות (5) הקרום ρ_c . הטבלה מחשבת אותה לשני הקצוות של הממוצע של GRAIL ולעובי של 55 ק"מ בצד הרחוק; העמודה האחרונה לוקחת מחצית מן הקליפה, המסה של חצי הכדור הרחוק לבדו בעובי הזה.

עובי בדוגמה	מסת הקרום	חלק ממסת הירח	חצי הכדור הרחוק לבדו בעובי זה
ק"מ 34	ק"ג 3.225×10^{21}	4.39%	ק"ג 1.6×10^{21}
ק"מ 43	ק"ג 4.057×10^{21}	5.52%	ק"ג 2.0×10^{21}
ק"מ 55	ק"ג 5.15×10^{21}	7.01% (קודם 7.02%)	ק"ג 2.6×10^{21}

הטבלה אינה שחזור גלובלי של GRAIL; היא ממחישה את דרישת המאזן. הקליפה של הכיפה נסגרת על חצי הכדור הרחוק לבדו: 2.85×10^{21} ק"ג של קליפה מול 2.6×10^{21} ק"ג של קרום בצד הרחוק בעובי 55 ק"מ — השניים מתאימים זה לזה בכ-10% (גרסה מוקדמת של השורה הזאת נתנה 5.18×10^{21} ק"ג, 7.05%, 2.7×10^{21} ק"ג והתאמה של 7%; חישוב מחדש של משוואה (5) באותה צפיפות, 2,550 ק"ג/מ"ק, נותן את הערכים שבטבלה עכשיו), בלי שום פרמטר שכוון ביניהם. עובי הקליפה ורדיוס הכיפה באים ממאמר 3; עובי הקרום וצפיפותו באים מן הנתונים הירחיים; אף אחד מהם לא כוון כדי לפגוש את האחר. ההתעבות פי שלושה של חלק A נובעת מאותה גאומטריה: קליפה של 18 ק"מ שפרושה על פני כיפה ששטחה גדול משטח חצי הכדור הרחוק, ונאספת אליו, הופכת לקרום בסדר גודל של 55 ק"מ. הקרום של הצד הקרוב, 30–35 ק"מ, אינו הקליפה של הכיפה; הוא הסיאל של הבסיס, שקולף יחד עם הגוף (מאמר 3, C.4a§), ומסתו, כ- 1.5×10^{21} ק"ג (משוואה (5) על חצי הכדור הקרוב בעובי 30–35 ק"מ: $1.4 - 1.7 \times 10^{21}$ ק"ג; גרסה קודמת נתנה כ- 2×10^{21} ק"ג), היא איבר נפרד במאזן. סיאל הוא השכבה החיצונית הקלה, העשירה בצורן ובאלומינה, של גוף האם, מן הסוג שבונה את היבשות של כדור הארץ; הגוף ישב עליה ולקח אותה איתו כשהתקלף. התווית המשותפת "סיאלי" אינה פותרת את ההבדלים המינרלוגיים בין חומר המקור הארצי לבין קרום ירחי עשיר בפלגיוקלז: ברמות הירח שולט פלגיוקלז, פלדספר סידן-אלומיניום, והדרך מהרכב אחד לאחר היא חלק מן המאזן שעוד צריך לחשב.



איור 3. מאזן המסה של B.3§. הקליפה על הכיפה של מאמר 3 (3.9% ממסת הירח) היא המסה של הקרום של הצד הרחוק לבדו (3.5% בעובי 55 ק"מ ובצפיפות 2,550 ק"ג/מ"ק; גרסה מוקדמת שרטטה 3.67%); הקרום של הצד הקרוב, הסיאל המקולף של הבסיס, הוא איבר נפרד. חלק הליבה (R2) הוא היעד שמאמר 3 חייב לספק.

איור 3 מעמיד את המסות זו לצד זו כחלקים ממסת הירח. שני העמודים הראשונים — הקליפה שהכיפה נשאה והקרום של הצד הרחוק שהיא חייבת לספק — כמעט שווים; שני העמודים הבהירים מראים את הקרום כולו בשני קצות הטווח של GRAIL, גדולים יותר משום שהם כוללים גם את הצד הקרוב; העמוד האדום הוא הליבה של R2, הכמות השנייה שההזנה של מאמר 3 חייבת לספק.

כישלון: שום מאזן של חומר ושל הרכב אינו מספק את הקרום ואת החיזוי המרחבי באותם פרמטרים. **מצב:** האסימטריה נצפתה; הפרופיל, מקור המסה והזיהוי עם הפתח פתוחים לבדיקה. מה שיש לנו עכשיו: הקרום עבה יותר בצד הרחוק, כנדרש; לקליפה של הכיפה יש המסה של הקרום של הצד הרחוק; והמבחן שיקבע את הפרופיל ואת הציר מוגדר.

B.4R4 — הסינכרוניות של היום והעבר המחובר

הירח מראה היום סיבוב סינכרוני בקירוב, עם ליברציות. סיבוב סינכרוני פירושו שהירח מסתובב פעם אחת סביב צירו בדיוק בזמן שלוקח לו להקיף פעם אחת את כדור הארץ, ולכן הוא מפנה אלינו תמיד את אותם פנים. ליברציות הן נדנודים קטנים, לכאורה, של הפנים האלה, הנגרמים בעיקר מן האליפטיות של המסלול ומן הנטייה של הציר, ומאפשרים לצופה על כדור הארץ לראות מעט מעבר לשוליים. הפטיש של זורק הפטיש מראה את אותה תמונה: כל עוד הוא מוחזק, הוא מראה לזורק את אותו צד בזמן ששניהם מסתובבים יחד. גוף המחובר לגוף האם שלו עושה אותו דבר, ו-R4 שואלת אם הירח שמר, אחרי השחרור, את הפנים שהיו לו כשהיה מחובר.

מצב כזה מתיישב עם ירושה של כיוון מזמן החיבור, וגם עם התפתחות גאותית אחרי דרכי היווצרות אחרות [S6]. התפתחות גאותית היא הבלימה האיטית של הסיבוב העצמי של ירח בידי הגאות שכוכב הלכת שלו מעורר בו, עד שהסיבוב מתאים למסלול; רוב הירחים הגדולים במערכת השמש ננעלו בדרך הזאת. ההבחנה דורשת יותר מן היחס 1:1: אל היחס לבדו מגיעים בשתי הדרכים, ולכן המבחן צריך לעסוק בשאלה אילו פנים ננעלו וכיצד הגיעו לשם.

מבחן: להעביר את הצורה, את הסיבוב ואת התנע הזוויתי ברגע השחרור ממאמר 2 אל החישוב של מאמר 4, ולבדוק את שימור הכיוון של אזור החיבור יחד עם ההתפתחות המסלולית. תנע זוויתי הוא כמות הסיבוב שגוף נושא — בגוף מסתובב או מקיף, המסה שלו כפול מהירותו כפול מרחקו מן הציר — והוא נשמר כל עוד אין מומנט כוח הפועל עליו. החישוב צריך להראות שהצד שפנה אל כדור הארץ ברגע השחרור הוא הצד שפונה אליו היום. **כישלון:** שום מסלול נתמך אינו משמר או משחזר את היחס הגאומטרי הנדרש. **מצב:** התאמה דינמית כללית; הרציפות מן החיבור אינה מוכחת.

R5 דורשת סדר מוגדר: הצד הרחוק נסגר ושמר את התיעוד שלו ראשון, בזמן שהצד הקרוב, שהוזן, נשאר חם ופעיל זמן רב יותר. בדיקה של סדר דורשת גילים, והתיעוד הירחי מציע כמה סוגי גיל שקל לבלבל ביניהם. תמונה יומיומית עוזרת. בבית ישן אפשר לתארך את שריפת הלבנים, שרפה שחרכה מאוחר יותר קיר אחד, שכבת צבע שנוספה אחר כך, ואת משך הזמן שהחזית עומדת ונשחקת. ארבעתם תאריכים אמיתיים של אותו בית, ואף אחד מהם לבדו אינו התאריך שבו הבית נבנה. ארבעת השעונים של הירח הם מן הסוג הזה.

שעון	מה הוא מודד	כיצד להשתמש בו
גיל ההתגבשות של חומר הקרום	היווצרות של מינרל או של יחידה, בכפוף לאיפוס מאוחר יותר	להשוות יחידות בעלות מקור ותהליך דומים
גיל פגיעה או גיל התכת פגיעה	אירוע ששינה קרום קיים	אינו גיל ההיווצרות של חצי כדור
גיל המילוי הבזלתי	התגבשות של לבה מאוחרת	מתאר פעילות געשית, לא בהכרח את גיל התשתית
גיל חשיפה או גיל שימור	משך התיעוד לפי מודל כרונולוגי	תלוי בקבורה, בשחיקה וברוויית מכתשים

כיצד לקרוא את הטבלה, שורה אחר שורה. גיל ההתגבשות נקבע כשמינרל גדל מתוך התכה ומתחיל ללכוד את תוצרי הדעיכה הרדיואקטיבית; זהו שעון הלבנים, אבל חימום חזק מאוחר יותר יכול לאפס אותו. גיל הפגיעה או גיל התכת הפגיעה — זה שמו בספרות — מתארך את האירוע שהתיך חלק מקרום שכבר היה במקומו; במודל, המכתשים נוצרו בידי חומר חוזר שנחת (מאמר 6), וגילים כאלה מתארכים את הנחיתות האלה, לא את בנייתו של חצי כדור. גיל המילוי הבזלתי מתארך את הלבה שהציפה מאוחר יותר את האגנים: הצבע, שנמרח על קיר ישן יותר. גיל החשיפה או השימור אינו נקרא מדגימה כלל: מעריכים אותו מצפיפות המכתשים על פני שטח, באמצעות מודל כרונולוגי, והוא אומר כמה זמן פני השטח שמרו את התיעוד שלהם — הוא תלוי בשאלה אם פני השטח נקברו, נשחקו, או נעשו צפופים כל כך במכתשים שחדשים מוחקים ישנים (רוויה). כל שעון מודד אפוא אירוע אחר, והכלל של הטבלה הוא שמותר להשוות גילים רק בתוך סוג אחד.

דגימות Chang'e-5 מתעדות בזלת בת כ-2.0 מיליארד שנה בצד הקרוב [S7]. המחקר של Chang'e-6 מתעד וולקניזם בצד הרחוק לפני כ-2.8 מיליארד שנה [S8]. שניהם גילי מילוי, השעון השלישי. אלה דוגמאות לפעילות מאוחרת בשני הצדדים; אין להסיק מהן שהצד הרחוק כולו נסגר בתאריך אחד, או שהצד הקרוב נשאר מחובר לכדור הארץ עד שהבזלת הזאת נוצרה. במודל הירח שוחרר זמן רב לפני שאחת מן הלבנות האלה פרצה.

הגיל המיוחס לאגן South Pole–Aitken מתארך אירוע באגן הזה, בתלות בזוהת החומר שתוארך: אם הדגימה היא התכה של האגן הזה או של אגן מאוחר יותר. גם תאריך מדויק אינו קובע שהקרום של הצד הקרוב עוד לא נוצר. הפרש כמו 4.5 פחות 3.9 מיליארד שנה אינו מודד אפוא 600 מיליון שנות בנייה: הוא מחסר קריאה של השעון השני מתאריך התחלה מונח, ואלה גילים מסוגים שונים. החלון הזה נשאר התרחיש של המחבר, ציר הזמן של הסדרה המוצג עם תנאי הסביבה של חלק A, עם דרישה נפרדת לבדוק את העקביות הכרונולוגית.

מבחן: לזוהת יחידות סגירה ושימור בשני צדי הגאומטריה, לתארך תהליכים בני השוואה ולבחון אם ההפרש נשאר אחרי שמפרידים בין פגיעה למילוי. במונחי הטבלה: להשוות שעון ראשון לשעון ראשון ורביעי לרביעי, על יחידות שנוצרו באותה דרך בשני הצדדים, ורק אז לשאול איזה צד ישן יותר. **כישלון:** יחידות מזוהות ומייצגות דורשות את הסדר ההפוך לזה שנחזה, מעבר לאי-הוודאות ולשינויים המאוחרים המותרים. **מצב:** לחישוב; נתוני הבזלת אינם האישוש הנדרש לסדר של היווצרות הקרום.

B.6R6 — המים שנמדדו מול המים שההובלה דורשת

R6-שני צדדים. ההזנה של מאמר 3 נזקקה לחומרים נדיפים — מים לפני הכול — כדי להוריד את הצפיפות של החומר העולה ולשמור אותו נייד. לכן הירח חייב עדיין לשאת את העקבה של המים האלה. סעיף זה מעמיד את מה שנמדד מול מה שהמנגנון דורש, ואלה שני גדלים שונים.

Hauri ועמיתיו מדדו 1,410–615 ppm מים בתכלילי התכה ירחיים שנלכדו באוליבין לפני ההתפרצות [S9]. תכליל התכה הוא טיפה זעירה של מאגמה שנאטמה בתוך גביש אוליבין בזמן שהגביש גדל מתחת לפני השטח. הגביש פועל כבקבוק אטום: כשהלבה התפרצה ואיבדה את הגזים שלה, הטיפה שמרה את המים שלה. כאן ppm הוא חלקים למיליון לפי מסה, כך ש-1,410 ppm הם כ-0.14% מים לפי מסה. Hauri ועמיתיו ציינו שערכים כאלה דומים לאלה של מאגמות מן המעטפת העליונה של כדור הארץ: פנים הירח אינו יבש.

המדידה הזאת נוגעת למאגמה שנשמרה בתכלילים ולכמה אזורי מקור ירחיים, ולא לריכוז אחיד בכל הירח בזמן היווצרותו. גם ריכוז במאגמה וריכוז במעטפת המקור אינם אותו גודל (Hauri et al., 2011): כשמקור נמס חלקית, המים מעדיפים את ההתכה, ולכן המאגמה עשירה יותר מן המעטפת שהולידה אותה.

בתיאור כללי, המים עוברים בין מקור, התכה, גז, חומר שנשמר וחומר שאבד. אפשר לכתוב מאזן של מאגר ירחי:

$$\frac{dM_{v,L}}{dt} = \dot{M}_{v,\text{in}} - \dot{M}_{v,\text{loss}}.$$

במילים: הקצב שבו משתנה מלאי החומרים הנדיפים של הירח, $M_{v,L}$, שווה לקצב שבו חומרים נדיפים מגיעים (עם ההזנה) פחות הקצב שבו הם אובדים (לחלל, בשחרור גזים, או חזרה לגוף האם). זהו המאזן של אמבטיה שהברז שלה פתוח והפקק שלה שלוף: גובה המים בסוף אומר מעט על הכמות שזרמה דרכה, אלא אם ידועים שני הזרמים. המשוואה הזאת דורשת מודל לשטפים ולהרכב; היא אינה משחזרת כשלעצמה את המלאי ההתחלתי. אטמוספירה עשירה באדים אינה מאששת את הצפיפות שנבחרה לחומר עמוק בלחץ גבוה: החומרים הנדיפים הדרושים כדי להקל את החומר חייבים להיות נוכחים בחומר עצמו, בעומק, במצב הפאזה שהלחץ מתיר.

מבחן: לגזור ממאמר 3 את הריכוז המינימלי ואת מצב הפאזה לאורך נתיב ההזנה, ולהעביר אותם דרך מודל של אובדן והתמיינות אל הריכוזים בדגימות. בקיצור: להתחיל מן המים שהמנגנון צריך, לחסר את מה שמשוואה (6) אומרת שאבד, ולהשוות את מה שנשאר ל-1,410–615 ppm של התכלילים. **כישלון:** תחום החומרים הנדיפים האפשרי אינו חופף לתחום הדרוש להפעלת ההובלה. דגימה אחת אינה מוכיחה שכל מאגרי היווצרות היו יבשים. **מצב:** חומרים נדיפים פנימיים נתמכים בדגימות; סגירת התפקיד הדינמי שלהם פתוחה.

מה שיש לנו עכשיו, בסוף B.1–B.6: החמצן, הליבה הקטנה, הצד הרחוק העבה, הפנים שנשמרו מופנים אל כדור הארץ, הלבנות המאוחרות בשני הצדדים והמים של הפנים — כולם נמצאים על הירח כפי שהדרך דורשת. לכל אחד מהם הוגדר בשמו החישוב שיהפוך את ההתאמה למבחן מכריע.

B.7R7 — חישוב משותף לעובי הקרום ולהיסט מרכז המסה

השאלה שסעיף זה עונה עליה היא אם הקרום העבה של הצד הרחוק מ-B.38 מסביר, באותם מספרים, גם תצפית שנייה ובלתי תלויה: מרכז המסה של הירח אינו יושב במרכז הצורה החיצונית שלו. צריך להבחין בין שני מרכזים. **מרכז הצורה** הוא המרכז הגאומטרי של פני הירח, המרכז שמתקבל כשמתאימים כדור לטופוגרפיה. **מרכז המסה** הוא נקודת שיווי המשקל של כל החומר שבו, הנקודה שסביבה הירח נע במסלולו. בירח שני המרכזים רחוקים זה מזה כ-2 ק"מ, ומרכז המסה נמצא בצד הפונה אל כדור הארץ.

הקשר לקרום ישיר: הקרום קל מן המעטפת שמתחתיו. במקום שבו הקרום עבה, חומר קל תופס נפח שאחרת היה מכיל מעטפת צפופה, ולכן הצד הזה של הירח קל יותר. כדור שצד אחד שלו מצופה מבפנים בשכבה עבה

של שעם והצד האחר בשכבה דקה מתאזן מחוץ למרכז: נקודת שיווי המשקל שלו זהה לעבר הצד שבו השעם דק, שם יותר מן הפנים הכבד מגיע קרוב לפני השטח. הירח הוא כדור לא מאוזן כזה: הצד הרחוק נושא את הקרום העבה, הצד הקרוב את הדק, ולכן מרכז המסה מוזז לעבר הצד הקרוב. מה שבא להלן הופך את התמונה הזאת למספר, כך שאפשר לבחון את מודל העובי ואת ההיסט יחד ולא כל אחד לחוד.

נבחר ציר x מן המרכז הגאומטרי לעבר החיבור, כלומר לעבר הצד הקרוב, שם הקרום הדק ביותר. מרכז המסה מחושב מן ההתפלגות המלאה:

$$\delta_x = \frac{1}{M_L} \int_V \rho(\mathbf{r}) x dV.$$

משוואה (7) היא ההגדרה של נקודת שיווי משקל: כל נפח קטן dV של הירח, שצפיפותו $\rho(\mathbf{r})$ במקום $\mathbf{r}$, תורם (7) את המסה שלו כפול המרחק שלו x לאורך הציר שנבחר; הסכום על פני כל הנפח V , מחולק במסת הירח M_L , הוא המרחק δ_x של מרכז המסה מן המרכז הגאומטרי. גוף סימטרי לחלוטין נותן אפס, משום שכל תרומה ב- $+x$ מתקזת עם תרומה שווה ב- $-x$. רק החלק הא-סימטרי של ההתפלגות נשאר.

בדוגמה כדורית עם קרום בעובי של משוואה (3), $h(\psi) = h_0 - A \cos \psi$, ועם צפיפויות קבועות $\rho_m > \rho_c$ למעטפת ולקרום, נגדיר את ניגוד הצפיפות $\Delta\rho = \rho_m - \rho_c$: המסה החסרה בכל מטר מעוקב שבו קרום עומד במקום מעטפת. ליבה סימטרית אינה מוסיפה מומנט מסה בכיוון הזה, משום שהיא ממורכזת ומתקזת בעצמה במשוואה (7). בקירוב הקליפה הדקה — כשמתייחסים לקרום כדק לעומת רדיוס הירח R_L , כך שכל השינוי שלו נמצא בערך באותו מרחק מן המרכז — האינטגרל נותן:

$$\delta_x \simeq \frac{4\pi\Delta\rho R_L^3 A}{3M_L} = \frac{\Delta\rho}{\rho_L} A.$$

משוואה (8) אומרת שההיסט שווה למשרעת A של שינוי העובי, מוקטנת ביחס שבין ניגוד הצפיפות $\Delta\rho$ (8) לצפיפות הממוצעת של הירח $\bar{\rho}_L$ (3,346 ק"ג/מ"ק, הערך שמשמש באיור 2). החלק הקבוע h_0 של הקרום זהה בכל כיוון ונופל מן החישוב; רק החלק שמשנתה מצד לצד, $A \cos \psi$, מזיז את נקודת שיווי המשקל. הצורה השנייה נובעת מן הראשונה משום ש- $M_L = \frac{4}{3}\pi R_L^3 \bar{\rho}_L$. קל להחזיק את התוצאה בראש: בניגוד של כמה מאות ק"ג/מ"ק, כעשירית מן הצפיפות הממוצעת, משרעת של 15 ק"מ נותנת היסט בסדר גודל של עשירית מ-15 ק"מ, כלומר בסדר גודל של 2-1 ק"מ.

הסימן חיובי: התרומה של הקרום מצביעה לעבר הצד הדק. זהו הכדור הלא מאוזן מן הפסקה שלמעלה: הצד הרחוק, שיש בו יותר קרום קל, הוא הצד הקל, ונקודת שיווי המשקל זהה הרחק ממנו.

צורת הקליפה הדקה מצביה את כל השינוי ברדיוס פני השטח. במציאות השינוי בקרום מופיע בבסיסו, שם גבול הקרום-מעטפת עולה מתחת לקרום דק ושוקע מתחת לקרום עבה. אינטגרציה על פני העובי הסופי של השכבה, כש- $b = R_L - h_0$ הוא הרדיוס הממוצע של הגבול הזה, נותנת:

$$\delta_x = \frac{4\pi\Delta\rho}{M_L} \left(\frac{b^3 A}{3} + \frac{b A^3}{5} \right).$$

למשוואה (9) אותו מבנה כמו למשוואה (8). האיבר הראשון שלה הוא איבר הקליפה הדקה כש- R_L מוחלף ב- b (9): הגבול המשתנה נמצא עמוק יותר, ברדיוס קטן יותר, ולכן זרוע המנוף שלו סביב המרכז קצרה יותר וההיסט קטן במקצת. האיבר השני, ב- A^3 , הוא תיקון קטן הנובע מן הגודל הסופי של השינוי עצמו. שתי המשוואות תוחמות את אותה פיזיקה; ההפרש ביניהן הוא המדד לכמה הפישוט של הקליפה הדקה משנה.

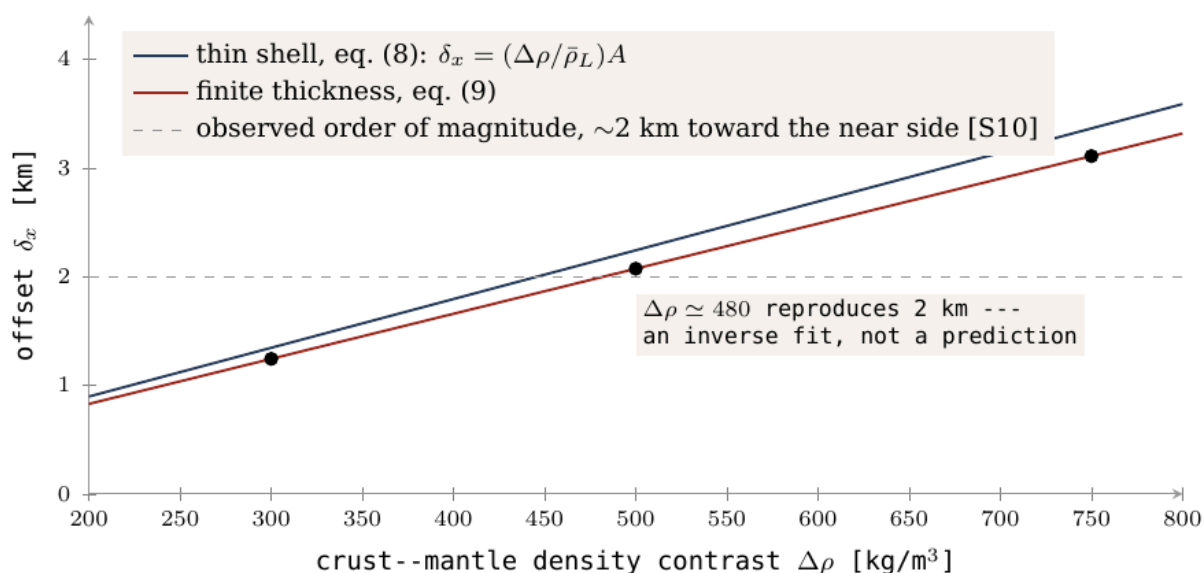
בדוגמה $h_0 = 45$ ק"מ ו- $A = 15$ ק"מ (ערכי הקצה 30 ו-60 ק"מ של איור 1). הטבלה נותנת את ההיסט לשלושה ניגודי צפיפות, בשתי המשוואות. קריאה לאורך שורה מראה את השפעת העובי הסופי (אחוזים ספורים), וקריאה לאורך עמודה מראה שההיסט גדל ביחס ישר ל- $\Delta\rho$:

$\Delta\rho$, ק"ג/מ"ק	קליפה דקה, ק"מ	אינטגרציה בעובי סופי, ק"מ
300	1.345	1.243
500	2.242	2.072
750	3.362	3.108

ההיסט הנצפה מן המרכז הגאומטרי הוא בסדר גודל של 2 ק"מ לעבר הצד הקרוב [S10]. הטבלה מראה שסדר הגודל הזה אפשרי בדוגמה: השורה האמצעית, ב-500 ק"ג/מ"ק, נותנת מעט יותר מ-2 ק"מ. היא אינה קובעת את צפיפות הקרום. כל שורת צפיפות היא מודל השוואה, שהחלק הסימטרי שלו צריך להיות מנורמל לאותה מסת ירח; שינוי $\Delta\rho$ תוך שמירה על המסה הכוללת של הירח מחייב התאמה של הצפיפויות במקומות אחרים, וההתאמה הזאת היא חלק מכל שורה. במודל מלא צריך לעמוד גם באילוצי המסה, הגאות ומומנט ההתמד. מומנט ההתמד מודד כיצד המסה פרושה בין המרכז לפני השטח — גוף עם ליבה צפופה מסתובב בקלות רבה יותר מגוף אחיד באותה מסה — והערך הנמדד של הירח, יחד עם המסה הכוללת ועם התגובה הגאותית, מגביל אילו מבני צפיפות מותרים.

בחירת צפיפות כדי לקבל בדיוק 2 ק"מ היא פתרון הפוך, כלומר התאמה לנתון: התשובה משמשת לקביעת הקלט. אסור לקרוא לה חיזוי בלתי תלוי. קודם יש לקבע את מודל הצפיפות והעובי ממידע נוסף, ורק אז לחשב ממנו את וקטור ההיסט כולו. מה שהחישוב כן מבסס הוא הסימן, סדר הגודל והרגישות: ההיסט החזוי מצביע לכיוון הנכון ויש לו הגודל הנכון בניגודים שבטווח שנבחן.

איור 2 מציג את אותה תוצאה כעקומה רציפה. הציר האופקי הוא ניגוד הצפיפות בין הקרום למעטפת, $\Delta\rho$, מ-200 עד 800 ק"ג/מ"ק; הציר האנכי הוא ההיסט δ_x בקילומטרים. הקו הכחול-כהה הוא תוצאת הקליפה הדקה, משוואה (8); הקו האדום, מעט מתחתיו, הוא תוצאת העובי הסופי, משוואה (9); שניהם קווים ישרים העוברים בראשית, משום שההיסט פרופורציוני ל- $\Delta\rho$. הנקודות השחורות הן שלוש שורות הטבלה. הקו האפור המקווקו ב-2 ק"מ הוא סדר הגודל הנצפה. במקום שבו הקו האדום חוצה את הקו המקווקו, סביב $\Delta\rho \approx 480$ ק"ג/מ"ק, המודל משחזר 2 ק"מ בדיוק — וההערה שעל הגרף מציינת שהחצייה הזאת היא התאמה ולא חיזוי.



איור 2. המבחן המשותף של B.7§: היסט מרכז המסה שהקרום של איור 1 יוצר, בטווח של ניגודי צפיפות בין הקרום למעטפת. הסימן מצביע לעבר הצד הדק (הקרוב), והגודל מכסה את סדר הגודל הנצפה; הצפיפות שמשחזרת 2 ק"מ בדיוק היא התאמה לנתון.

גם הציר חשוב. החישוב שלמעלה הניח שהצד הדק, החיבור וכיוון ההיסט נמצאים כולם על קו אחד. בירח האמיתי זה לא חייב להיות כך. מרכז המגע כפי שהמחבר שרטט אותו, 24.1° צפון ו- 335.2° מזרח (מאמר 3, §B.4), נמצא כ- 34.0° מן הנקודה $0^{\circ}, 0^{\circ}$ במפת ייחוס — הנקודה התת-ארצית, שדרכה עובר קו כדור הארץ הממוצע (הקו ממרכז הירח לעבר הכיוון הממוצע של כדור הארץ). מודל צירי סביב מרכז המגע אינו חוזה אפוא באופן אוטומטי היסט ישר לאורך קו כדור הארץ הממוצע; הוא חוזה היסט נטוי לעבר המגע. צריך להבחין בין ציר ההתעבות, מרכז אזור החיבור וכיוון מרכז המסה, ולחשב את רכיבי הווקטור: המבחן משווה כיוון ולא רק אורך.

מבחן: התאמה משותפת של עובי, צפיפות, טופוגרפיה והיסט באותה מערכת קואורדינטות. **כישלון:** אין מודל צפיפות נתמך שמסביר את הגודל ואת הכיוון יחד עם שאר האילוצים על פנים הירח. **מצב:** הסימן והרגישות נגזרו בתנאים מפורשים; המבחן הגלובלי פתוח.

מה שיש לנו עכשיו: הקרום של §B.3 מזיז את מרכז המסה לעבר הצד הקרוב, בשיעור מסדר הגודל הנצפה, בניגודי צפיפות של כמה מאות ק"ג/מ"ק. הסעיף הבא עובר מעובי הקרום לבדו אל הסידור המלא של פני הירח שהמנגנון חוזה.

B.8R8 — אזורי החשיפה

סעיף זה מציג את המבחן שהמנגנון מהמר עליו יותר מכול. הוא נובע מן האופן שבו פני הירח נחשפו, שלב אחר שלב, בזמן שהגוף נוצר והתנתק.

אם הקליפה עלתה כפני השטח של חצי כדור, ופני השטח האלה נסגרו לצד הרחוק בזמן שהבסיס הפך לצד הקרוב (מאמר 3, §B.4), חלקים שונים של הירח של היום נחשפו לחלל בזמנים שונים. פני השטח המעוגלים של הכיפה היו פתוחים לחלל מן ההתחלה, משלב הכיפה השטוחה והלאה. הבסיס השטוח ישב על גוף האם; כשחצי הכדור התעגל לכדור, הבסיס התרומם ממנו משוליו פנימה, כמו כוס יניקה שמקלפים מזכוכית: היא משתחררת קודם בשוליה ואחרונה במרכזה. החלק האחרון שהשתחרר היה המגע עצמו, שנחשף רק בשחרור. פני הירח רושמים אפוא את סדר החשיפה של הכיפה כשלושה אזורים קונצנטריים סביב מרכז הצד הקרוב:

- המגע, שנחשף אחרון, בתוך כ- 41° ;
- טבעת הבסיס, שנחשפה במהלך ההתעגלות, מ- 41° עד 90° ;
- פני השטח של הכיפה, שנחשפו משלב הכיפה השטוחה, מעבר ל- 90° .

הזוויות נובעות מכלל התרגום של מאמר 3, שממפה כל חלק של הכיפה על הכדור המוגמר: שולי הבסיס הופכים לקצה הדיסקה של היום (הלימב) ב- 90° , והמגע, רבע מן הבסיס, הופך לכיפה בצד הקרוב ברדיוס של כ- 41° . הגבולות 41° ו- 90° היו כלל החשיפה בזמן מבחני ספטמבר המדווחים להלן; כלל התרגום הנוכחי של מאמר 3 מציב אותם ב- 31° וב- 70° — כיפת המגע 0° – 31° , החגורה 31° – 70° והחלק הרחוק 70° – 180° , סביב מרכז מגע ב- $N 335.2^{\circ}E 24.1^{\circ}$ — והחישוב החוזר בסוף התוצאות משתמש בו.

שלוש תכונות נובעות מן הסדר הזה. הצד הרחוק, הקליפה לשעבר, התעבה בסגירה ולכן נושא את הקרום העבה ביותר. הוא היה חשוף הזמן הרב ביותר ולכן נושא את המכתשים העתיקים ביותר. והאגנים שנוצרו בכל אזור רושמים את התנאים של אותו אזור בזמן היווצרותם. עובי הקרום, אוכלוסיית המכתשים העתיקה ביותר ואופי האגנים צריכים להסתדר לפי המרחק הזוויתי ממרכז הצד הקרוב, ולא לפי שום ציר אחר. זהו החיזוי היחיד החזק ביותר של המנגנון, והמבחן מוצג כאן עם ספים כדי שיוכל להיכשל. הציר, החגורות והספים נקבעו לפני החישוב; התוצאות המדווחות להלן נמדדו מולם.

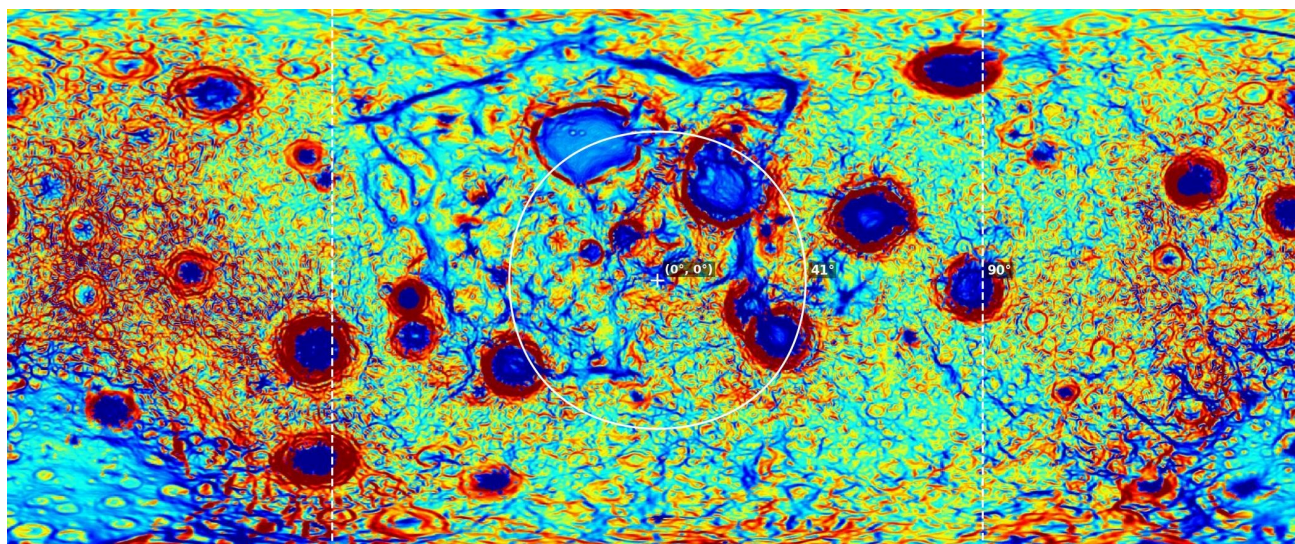
הציר. הסידור נמדד כמרחק זוויתי θ מציר העובר במרכז הירח. הציר הראשי הוא הנקודה התת-ארצית, $N 0^{\circ}E 0^{\circ}$ — הנקודה על הירח שנמצאת ישירות מתחת לכדור הארץ — משום שהמגע פנה אל כדור הארץ והירח שמר על הפנים האלה. כבדיקת רגישות, המבחן חוזר על עצמו עם ציר במרכז אזור Procellarum, בערך $N 320^{\circ}E 23^{\circ}$,

(המגע, כפי שהמחבר שרטט אותו מאוחר יותר, ממורכז ב- $335.2^{\circ}\text{E}24.1^{\circ}\text{N}$, מאמר 3); הסידור החזוי חייב להתקיים עבור הציר הראשי, ואסור שישתפר באופן מהותי עבור ציר שלישי שרירותי (הנקודה הנגדית לנקודה התת-ארצית, או הקוטב הצפוני). צירי הבקרה הם ההגנה מפני דפוס שהיה מופיע סביב כל ציר: אילו הקרום היה מסודר באותה מידה סביב הקוטב הצפוני, הסידור לא היה אומר דבר על המנגנון.

החגורות. ממוצעים משוקללים לפי שטח בשלוש חגורות של מרחק זוויתי θ מן הציר: דיסקת המגע ($0^{\circ}-41^{\circ}$, 12.5% מן השטח, שמינית), חגורת הקצה ($41^{\circ}-90^{\circ}$, 37.5%), והצד הרחוק ($90^{\circ}-180^{\circ}$, 50%). השקלול לפי שטח נחוץ משום שתאי הרשת במפה מתכווצים לעבר הקטבים של הרשת; בלעדיו, תאים קטנים היו נספרים כמו גדולים. למגמה משמשות שתי-עשרה חגורות של 15° ; סטטיסטיקת המגמה של T5 היא מקדם המתאם הדרגתי של Spearman בין מספר החגורה לממוצע החגורה על פני שתי-עשרה החגורות האלה, ולצדה מדווחים ההפרשים בין שלושת ממוצעי החגורות של T1. מתאם הדרגות של Spearman מדרג את החגורות לפי ערכיהן הממוצעים ושואל עד כמה הדירוג הזה עוקב אחר סדר החגורות מן הציר החוצה: $+1$ פירושו שכל חגורה עבה מזו שלפניה, 0 פירושו שאין סדר, ו-1- ירידה עקבית. הוא בודק את הסדר ולא את צורת העלייה, וזה בדיוק מה שהחזוי קובע.

הימות אינם ממוסכים. הם הקרום הדק ביותר בצד הקרוב, ובמודל הם הפתחים של דיסקת המגע (מאמר 3, B.5§) ופני השטח הצעירים ביותר שלה — החזוי עצמו, בשני המבחנים: קרום דק ופני שטח עם מעט מכתשים עתיקים במרכז. מיסוך שלהם היה מוציא את החזוי מן המבחן. המסכה המקובלת לספירת מכתשים, שמתייחסת לבזלת ככיסוי מעל אוכלוסייה עתיקה יותר, מדווחת לצד התוצאה לשם השוואה, כך שהקורא יוכל לראות את התוצאה בשתי הקריאות. שני הגבולות משורטטים על מפת הגרדיאנט באיור 6.

איור 6 מציג את מונחי הכבידה שמשמשים במבחנים. *Bouguer* אנומליית היא הכבידה שנמדדה בידי חלליות GRAIL לאחר שהוסרה ממנה המשיכה של הטופוגרפיה הנראית; מה שנשאר מראה את המסה החבויה מתחת לפני השטח. *mascon* (ריכוז מסה) הוא אנומליית *Bouguer* חיובית חזקה מתחת לאגן: חומר צפוף נמצא קרוב מתחתיו. אגן מסקון טבעתי מראה, בנוסף, טבעת מובחנת בסימן הפוך סביב המרכז. באיור 6 קראו קודם את שני המעגלים: בתוך המעגל הרציף נמצאת דיסקת המגע, בין המעגלים חגורת הקצה, ומחוץ למעגל המקווקו הצד הרחוק. אחר כך הביטו היכן נופלים המסקונים הכחולים ביחס אליהם.



איור 6. שלושת אזורי החשיפה על מפת הגרדיאנט של Bouguer מ-GRAIL. מעגלים ב- 41° (רציף) וב- 90° (מקווקו) מן הנקודה התת-ארצית $(0^\circ, 0^\circ)$ מסמנים את דיסקת המגע, את חגורת הקצה ואת הצד הרחוק של כלל התרגום כפי ששימש למבחי ספטמבר (מאמר 3, B.4§; הגבולות הנוכחיים ב-B.8§). כחול: ריכוזי מסה מתחת לקרום דק; אדום: השוליים שלהם. המסקונים הלא-טבעתיים החזקים ביותר נמצאים בתוך דיסקת המגע, האגנים הטבעתיים בחגורה, והאגנים על קרום עבה מעבר לה (מבחינים T1–T5). היטל גלילי ממורכז ב- $0^\circ E$, קווי רוחב $\pm 75^\circ$; הצד הרחוק מפוצל בין שני שולי המפה. קרדיט: LROC QuickMap (NASA/GSFC/Arizona State University); גרדיאנטים של כבידת Bouguer מ-GRAIL (NASA/JPL-Caltech/MIT).

חמשת המבחינים מוצגים בטבלה שלהלן. כל שורה מציינת את הנתונים שבהם משתמשים, את מה שהמודל חוזה, את התוצאה שנחשבת מעבר ואת התוצאה שמפריכה את המודל. בין סף המעבר לקו ההפרכה יש טווח שבו המבחן אינו מוכרע: הנתונים אינם מאשרים את החיזוי בעוצמה שנקבעה, וגם אינם סותרים אותו.

מבחן	מוצר נתונים	חיזוי	סף למעבר	מופרך אם
T1 — עובי הקרום	מודל עובי הקרום של GRAIL עם העוגן הסייסמי [S3], רשת של 1°	העובי הממוצע עולה מדיסקת המגע לחגורת הקצה ולצד הרחוק	ממוצע כל חגורה גדול מזה של הקודמת ב- 5 ק"מ ; הצד הרחוק פחות דיסקת המגע 15 ק"מ ; בחגורות של 15° , לא יותר מהיפוך מגמה אחד	הצד הרחוק פחות דיסקת המגע $< 10 \text{ ק"מ}$, או שהסידור בשלוש החגורות אינו מונוטוני
T2 — המכתשים העתיקים ביותר	מכתשים של $\geq 20 \text{ ק"מ}$ ששויכו לתקופה הקדם-נקטריט או הנקטריט [S12], צפיפות שטחית ל- 10^6 קמ"ר, הימות כלולים	הצד הרחוק הצפוף ביותר, חגורת הקצה בתווך, דיסקת המגע הדלילה ביותר; חסם עליון רחוק/קצה $= 3$ לאוכלוסייה שנישאה כולה כלפי מעלה	רחוק/קצה ≥ 1.3 ; רחוק/דיסקה ≥ 1.5 ; קצה/דיסקה ≥ 1.1	רחוק/קצה < 1.1 , או שדיסקת המגע צפופה כמו הצד הרחוק
T3 — אגני מסקון טבעתיים	אגנים עם ריכוז מסה ועם טבעת מובחנת בגרדיאנט Bouguer של GRAIL [S3, S4]	המרכזים מרוכזים בחגורת הקצה	$\geq 60\%$ מאגני המסקון הטבעתיים מרכזם ב- 41° – 105° מן הציר	$< 40\%$ או התפלגות אחידה ב- $\cos \theta$

T4 — מסקונים לא-טבעתיים	האגנים עם אנומליות Bouguer החיוביות החזקות ביותר וללא טבעת חיצונית מובחנת	המרכזים בתוך דיסקת המגע ובשוליה 50°	70% ≥ מעשרת החזקים ביותר בתוך	50% <
T5 — ייחודיות הציר	כל האמור לעיל, חוזר עבור הציר התת-ארצי, ציר Procellarum ושני צירי בקרה	הסידור קיים בשני הראשונים ונעדר בצירי הבקרה	סטטיסטיקת המגמה של כל אחד מצירי הבקרה נמוכה ממחצית זו של הציר הראשי	ציר בקרה מסדר את הנתונים טוב כמו הציר הראשי

במילים פשוטות, חמשת המבחנים שואלים:

- **T1** — האם הקרום הדק ביותר בדיסקת המגע, ביניים בחגורת הקצה והעבה ביותר בצד הרחוק, בפערים ברורים? העוגן הסייסמי הוא עובי קרום שנמדד בסייסמומטרים של Apollo, והוא קובע את הרמה המוחלטת של המודל שנגזר מן הכבידה.
- **T2** — האם המכתשים העתיקים (מן התקופה הקדם-נקטריט והנקטריט, לפני היווצרות אגן Nectaris ובמהלכה) צפופים ביותר בצד הרחוק ודלילים ביותר במרכז? החסם העליון 3 הוא הצפיפות הגדולה ביותר האפשרית אם אוכלוסייה שנוצרה על הכיפה שרדה את סגירתה במלואה.
- **T3** — האם אגני המסקון הטבעתיים נמצאים בעיקר בחגורת הקצה? הגבול של 105° מאפשר שוליים מעט מעבר לקצה הדיסקה. התפלגות אחידה ב- $\cos \theta$ היא מה שאגנים הפזורים באקראי על הכדור היו נותנים.
- **T4** — האם המסקונים החזקים ביותר ללא טבעות נמצאים בדיסקת המגע ובסביבתה?
- **T5** — האם הסידור ייחודי לציר החזוי, או שכל ציר היה עושה את העבודה באותה מידה?

קריאה של המפות שפורסמו נותנת תחושה של התוצאה: הקרום בצד הרחוק עבה מזה של הצד הקרוב בכל מודל של [S3] GRAIL, בכ-8 ק"מ בממוצע. חצאי הכדור (30.0 מול 38.0 ק"מ במודל 1); הרמות בצד הרחוק נושאות צפיפות גבוהה יותר של מכתשים עתיקים גדולים מן הרמות בצד הקרוב [S12]; ואגני המסקון הטבעתיים — Orientale, Crisium, Humorum, Nectaris, Smythii, Humboldtianum, Moscoviense — נמצאים בקצה הדיסקה, בעוד המסקונים הלא-טבעתיים החזקים ביותר — Imbrium, Serenitatis, Procellarum — נמצאים קרוב למרכז. פרשנויות המפות האלה מזהות התאמות אפשריות לבדיקה; הן אינן מבחנים שעברו: הספים שלמעלה הם מה שסטטיסטיקות החגורות צריכות להראות, כשהציר והמסכה קבועים לפני החישוב. איורים 7–11 מציגים את שלושת האזורים כפי שהם נראים במפות שפורסמו.

תוצאות (ספטמבר 2026). שלושת המבחנים T1, T2 ו-T5 הורצו על הנתונים שפורסמו, עם הציר, החגורות והספים שלמעלה.

T1 — עובי הקרום. המבחן הורץ על ארבעת מודלי עובי הקרום בארכיון [S3] GRAIL (רשתות של 0.25°, ממוצעים גלובליים של 34, 35, 43 ו-43 ק"מ). ארבעת המודלים נשענים על הנחות שונות, שמעלות או מורידות את הקרום כולו, כפי שמראים הממוצעים הגלובליים השונים שלהם; השאלה היא אם הסידור שורד בכל אחד מהם. ממוצעי החגורות לדיסקת המגע, לחגורת הקצה ולצד הרחוק ניתנים בטבלה שלהלן; הצבע מעמיק ככל שהקרום מתעבה, ובכל שורה הוא מעמיק משמאל לימין.

מודל GRAIL	דיסקת המגע, ק"מ	חגורת הקצה, ק"מ	הצד הרחוק, ק"מ	רחוק פחות דיסקה, ק"מ
מודל 1	28.3	30.6	38.0	9.65

מודל 2	29.1	31.4	39.2	10.0
מודל 3	37.0	39.3	47.3	10.3
מודל 4	36.8	39.1	47.4	10.6

הסידור מונוטוני בכל ארבעת המודלים: בכל מודל הקרום הדק ביותר בדיסקת המגע, עבה יותר בחגורת הקצה, והעבה ביותר בצד הרחוק. הניגוד בין הצד הרחוק לדיסקת המגע הוא 10.0, 10.3 ו-10.6 ק"מ במודלים 1–4 (ההפרשים נלקחו מממוצעי החגורות שלא עוגלו), מול הקווים שנקבעו מראש: מעבר ב-15 ק"מ, הפרכה מתחת ל-10 ק"מ. במודל 1 ההפרש, 9.65 ק"מ, נמצא 0.35 ק"מ מתחת לקו ההפרכה; מודלים 2–4 נמצאים בין הקווים (10.0 על הקו, 10.3, 10.6). הסידור דיסקת המגע < חגורת הקצה < הצד הרחוק מתקיים בכל הארבעה. T1 אפוא לא עבר; במודל 1 הוא עונה על קריטריון ההפרכה שלו עצמו ב-0.35 ק"מ (גרסה קודמת אמרה שהניגוד מעל קו ההפרכה בשלושה מודלים מתוך ארבעה וקראה ל-T1 לא מוכרע). הצעד הגדול ביותר הוא מחגורת הקצה לצד הרחוק; הצעד מדיסקת המגע לחגורת הקצה קטן מ-5 הק"מ לצעד שסף המעבר דורש.

T5 — "יחודיות הציר". שתיים-עשרה חגורות של 15° סביב הציר התת-ארצי נותנות מתאם דרגות של Spearman של $+0.87$ ($p = 2 \times 10^{-4}$) בכל מודל. ההסתברות p היא הסיכוי שסידור חזק כל כך ייווצר בשתיים-עשרה חגורות בלי מגמה אמיתית: כשניים לעשרת אלפים. במודל 1 מממוצעי החגורות עולים מ-26.8 ק"מ ב-30°–45° ל-45.6 ק"מ ב-165°–180°, באופן מונוטוני לאורך עשר חגורות רצופות (גרסה קודמת אמרה תשע). צירי הבקרה נותנים -0.43 ו- $+0.43$ לקוטב הצפוני ולקוטב הדרומי, $+0.76$ לשפה המזרחית של הירח ו- $+0.74$ לציר T5. Procellarum. עובר: הציר החזוי מארגן את הקרום טוב יותר מכל ציר בקרה. ציר Procellarum מתקרב, כצפוי, משום שהוא נמצא רק כמה עשרות מעלות מן הנקודה התת-ארצית וחולק חלק גדול מאותו דפוס; הקטבים, שהמנגנון אינו נותן להם שום תפקיד, מסדרים את הקרום באופן חלש ובכיוונים מנוגדים.

T2 — המכתשים העתיקים ביותר. המבחן הורץ על קטלוג Robbins [S13] של מכתשים בקוטר 20 ק"מ ומעלה (6,973 מכתשים, מכל הגילים, משום שקטלוג שנבחר לפי גיל לא היה נגיש). הוא נותן את הצפיפויות שלהלן, במכתשים ל- 10^6 קמ"ר; הצבע מעמיק עם צפיפות המכתשים, ושוב מעמיק ממרכז הצד הקרוב החוצה.

ספירה	דיסקת המגע	חגורת הקצה	הצד הרחוק
הימות כלולים (המבחן)	99	164	219
מסכת ימות מקובלת	160	193	218

כשהימות כלולים, היחסים הם רחוק/קצה 1.34, רחוק/דיסקה 2.21, קצה/דיסקה 1.65, כל אחד מעל סף המעבר שלו (1.3, 1.5, 1.1). הצד הרחוק נושא יותר מפי שניים מצפיפות המכתשים של דיסקת המגע. המכתשים המעטים והצעירים על הימות הם, במודל, נחיתות לאחר השחרור — חומר ארצי שנזרק ונלכד בידי הירח (מאמר M.1§, 6, עם תוספת מאוחרת של אבק חלל דק — על פני השטח שנחשפו אחרונים. T2 עובר בכל שלושת היחסים. כשמפעילים את מסכת הימות המקובלת, הצפיפויות, ל- 10^6 קמ"ר של שטח לא ממוסך, נותנות יחסים של 1.13, 1.37, 1.21 — אותו סידור, מעל קו ההפרכה. הסידור אינו תלוי אפוא באופן שבו מטפלים בימות; המיסוך מצמצם את הניגוד אך אינו הופך אותו. הספירה לפי גיל, שהמבחן מגדיר, עדיין לא נעשתה: הספירה מכל הגילים כוללת מכתשים צעירים יותר, שבמודל נחתו על כל האזורים לאחר השחרור, ולכן מדללים את הניגוד ולא יוצרים אותו.

T3 ו-T4 לא הורצו. הנתונים, הסקריפטים וממוצעי החגורות נמצאים בחבילת השחזור.

חישוב חוזר על הגאומטריה הנוכחית (15 באוקטובר 2026). מבחני ספטמבר השתמשו בציר התת-ארצי ובגבולות 41° ו-90°. הסדרה מציבה כעת את מרכז המגע ב-24.1°E 335.2°N, 34.0° מן הנקודה התת-ארצית (נספח A), עם כיפת המגע ב-0°–31°, החגורה ב-31°–70° והחלק הרחוק ב-70°–180° (מאמר 3). צפיפויות

המכתשים ועובי הקרום של מודל 1 חושבו מחדש על הגאומטריה הזאת. זהו חישוב חוזר על האזורים הנוכחיים, לא מבחן חדש: הספים הם אלה של הטבלה שלמעלה, כשכיפת המגע, החגורה והחלק הרחוק באים במקום דיסקת המגע, חגורת הקצה והצד הרחוק.

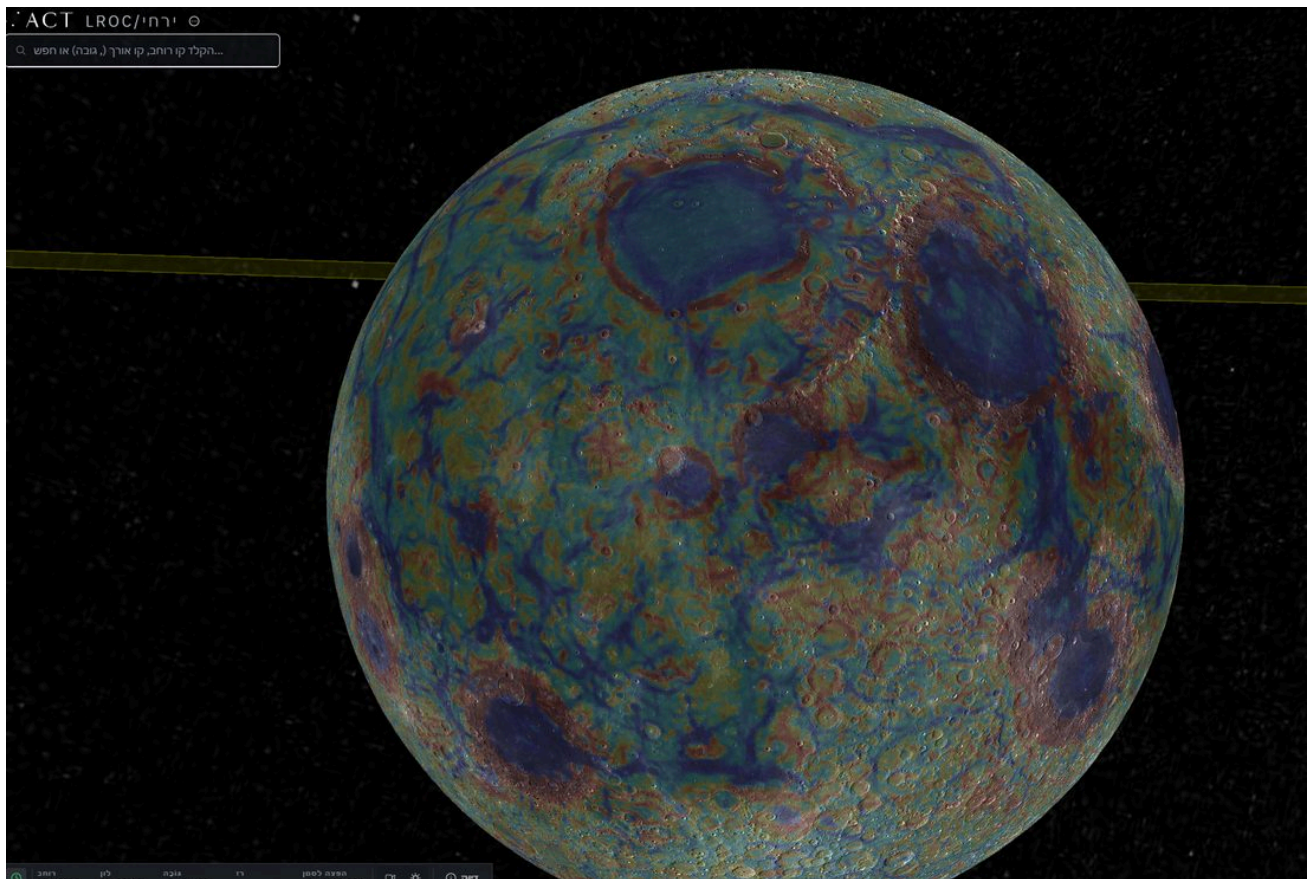
גודל (גאומטריה נוכחית)	כיפת המגע	החגורה	החלק הרחוק	יחסים או הפרש
מכתשים ≥ 20 ק"מ ל- 10^6 קמ"ר, הימות ו-SPA הוסרו	53	187	220	1.17 / 4.15 / 3.55
מכתשים ≥ 20 ק"מ ל- 10^6 קמ"ר, הימות נספרים	26	148	215	1.45 / 8.42 / 5.81
קרום, מודל 1, ק"מ, הימות נשארים	26.3	30.3	36.2	רחוק פחות כיפה 9.9
קרום, מודל 1, ק"מ, הימות ו-SPA הוסרו	31.3	33.0	38.9	רחוק פחות כיפה 7.5

היחסים הם רחוק/חגורה, רחוק/כיפה וחגורה/כיפה; היחסים וההפרשים נלקחו מן הערכים שלא עוגלו. הצבע מעמיק עם הערך; בכל שורה הוא מעמיק מכיפת המגע החוצה.

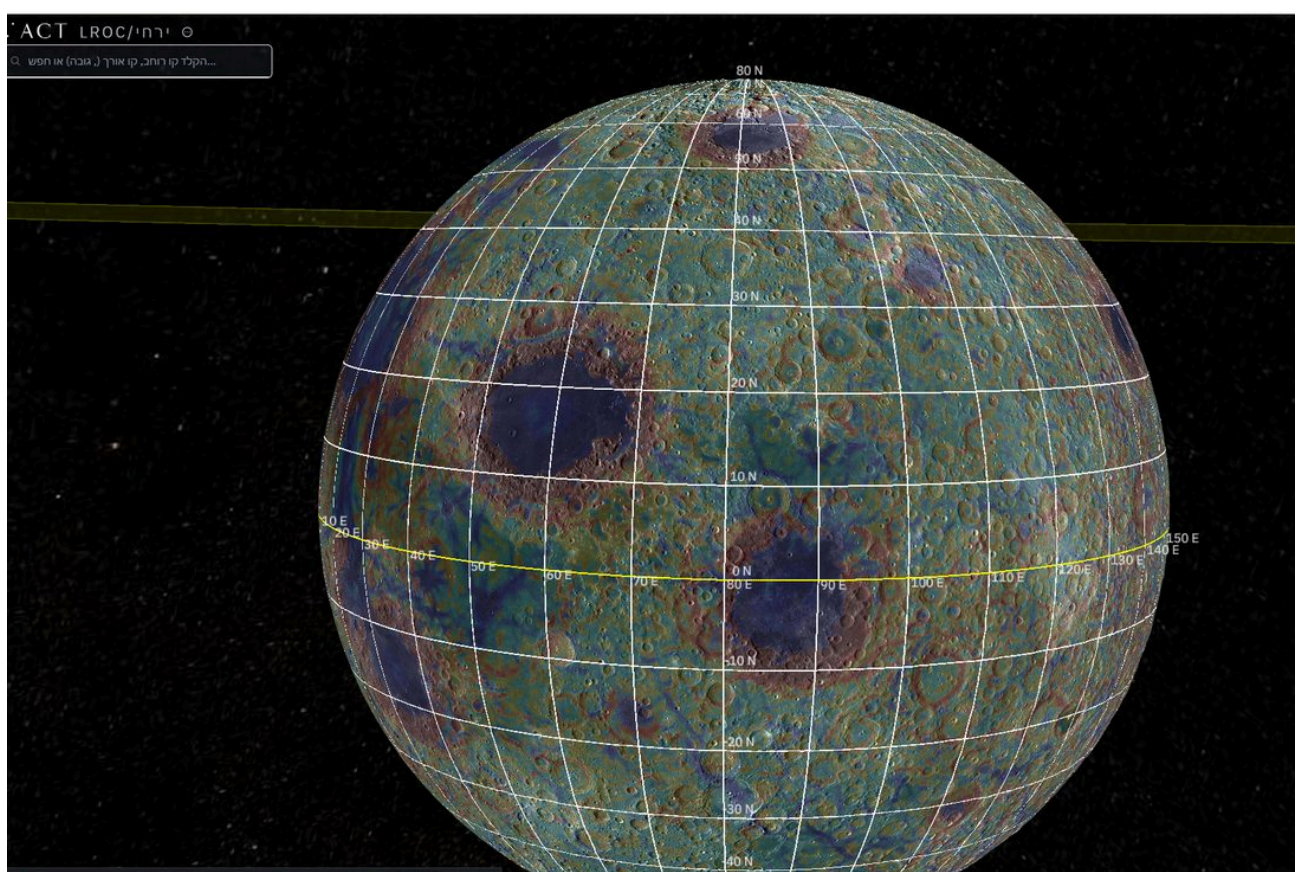
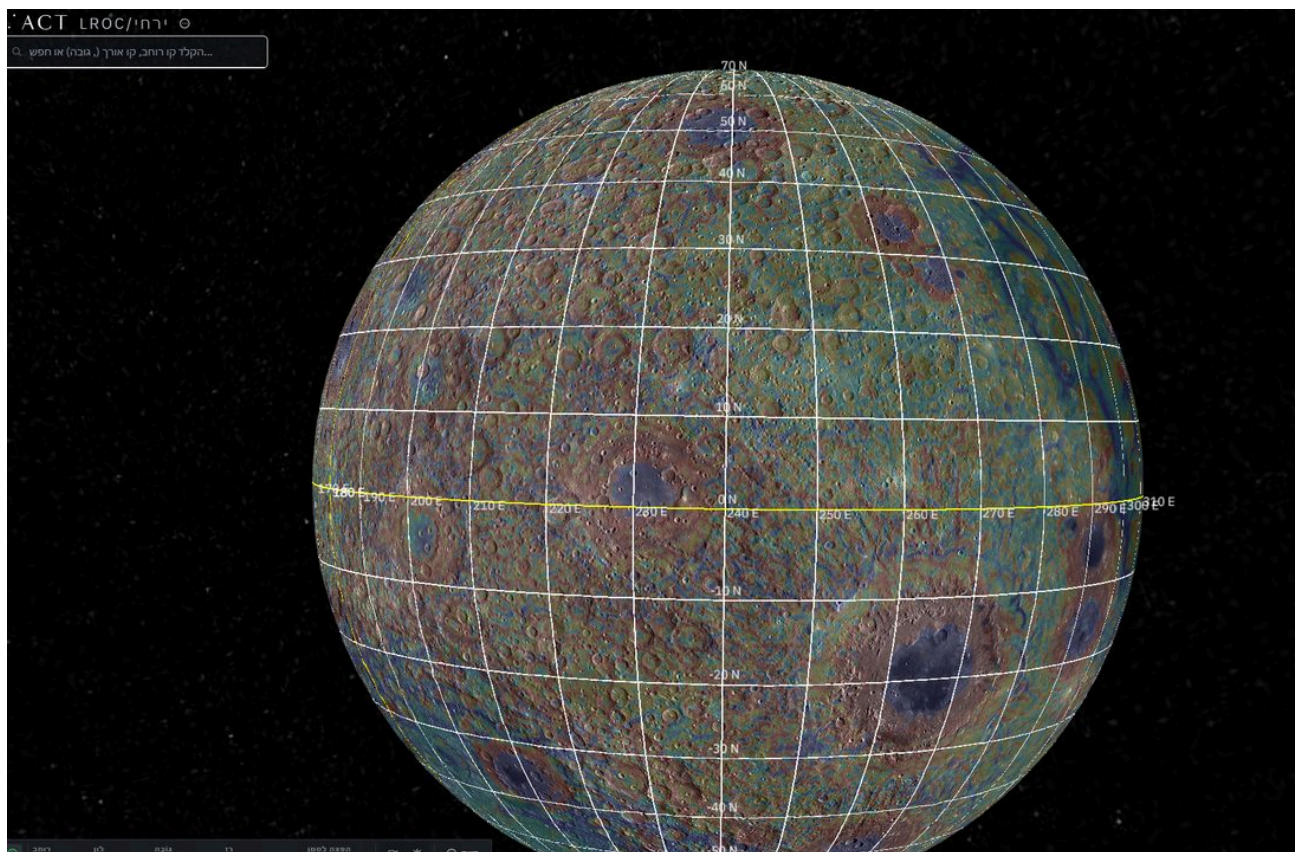
מכתשים (Robbins, $20 \geq$ ק"מ [S13]). כשהימות ו-SPA מוסרים הן מן הספירות והן מן השטחים, כך שמשוויים דומה לדומה, הצפיפויות הן 53, 187 ו-220 ל- 10^6 קמ"ר בכיפת המגע, בחגורה ובחלק הרחוק: רחוק/חגורה 1.17, רחוק/כיפה 4.15, חגורה/כיפה 3.55, מול קווי T2 (רחוק/קצה ≥ 1.3 , רחוק/דיסקה ≥ 1.5 , קצה/דיסקה ≥ 1.1 ; מופרך אם רחוק/קצה < 1.1). הסידור מתקיים; שניים משלושת היחסים עוברים, ורחוק/חגורה נמצא בין הקווים שלו. כשהימות נספרים, המוסכמה של ספטמבר, הצפיפויות הן 26, 148 ו-215, והיחסים 1.45, 8.42 ו-5.81.

עובי הקרום (GRAIL מודל 1 ברזולוציה של 1°). כשהימות נשארים — המוסכמה של T1, משום שהימות הם הפתחים — הממוצעים הם 26.3, 30.3 ו-36.2 ק"מ: הסידור מתקיים, והחלק הרחוק עולה על כיפת המגע ב-9.9 ק"מ. כשהימות ו-SPA מוסרים הם 31.3, 33.0 ו-38.9 ק"מ, הפרש של 7.5 ק"מ. מודלים 2–4 דורשים את הרשתות המלאות ונשארים להרצה החוזרת; על הגאומטריה של ספטמבר הם נתנו הפרש רחוק פחות דיסקה גבוה ב-0.37–0.92 ק"מ מזה של מודל 1.

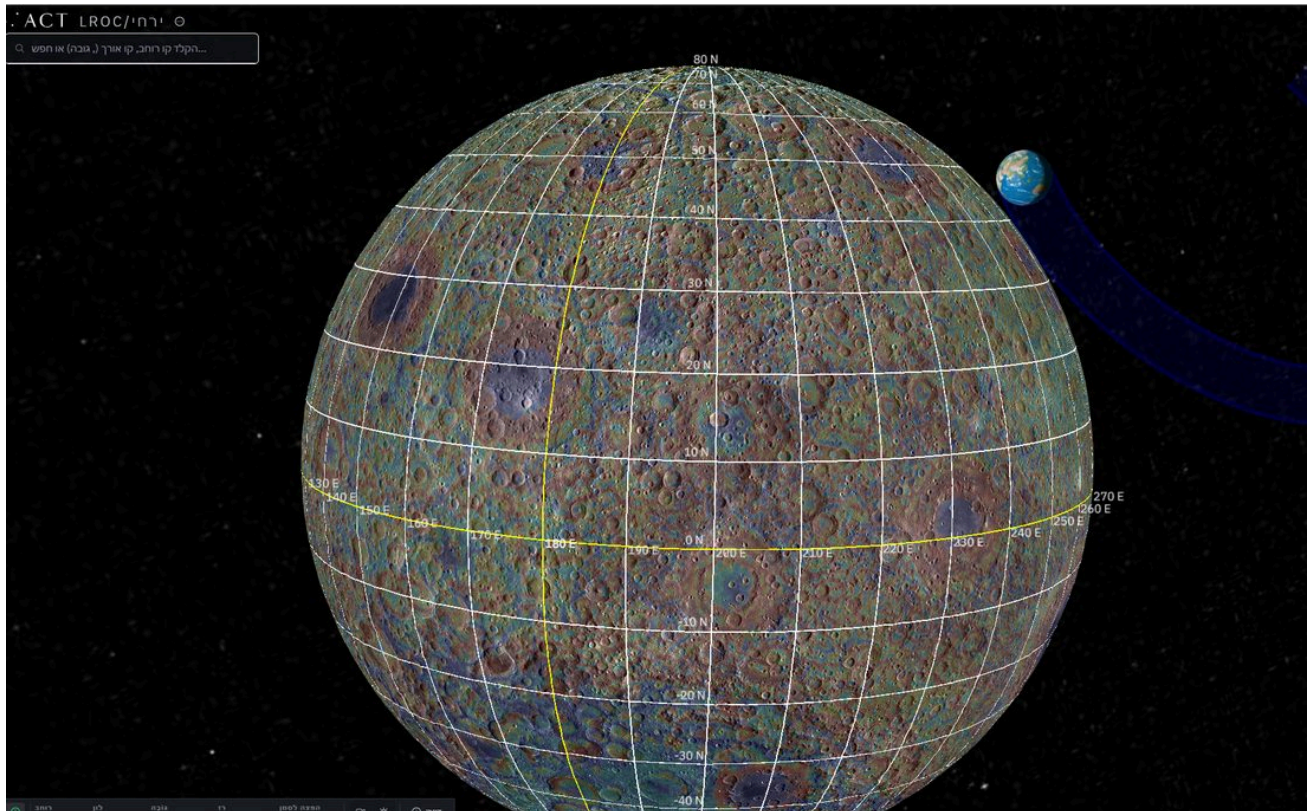
חמשת האיורים הבאים מציגים את שלושת האזורים כפי שהם נראים במפות שפורסמו. איורים 7–9 הם מבטי גלובוס, אחד לכל אזור, ממרכז הצד הקרוב לקצה הדיסקה ולצד הרחוק; איורים 10 ו-11 הן מפות של הירח כולו, של כבידה ושל גובה, שעליהן אפשר לקרוא את האזורים זה לצד זה. בכל אחד מהם חפשו את אותו רצף ממרכז הצד הקרוב החוצה: מסקונים חזקים ללא טבעות, אחר כך אגנים טבעתיים, ואחר כך אגנים על קרום עבה וגבוה בלי אף אחד מהשניים.



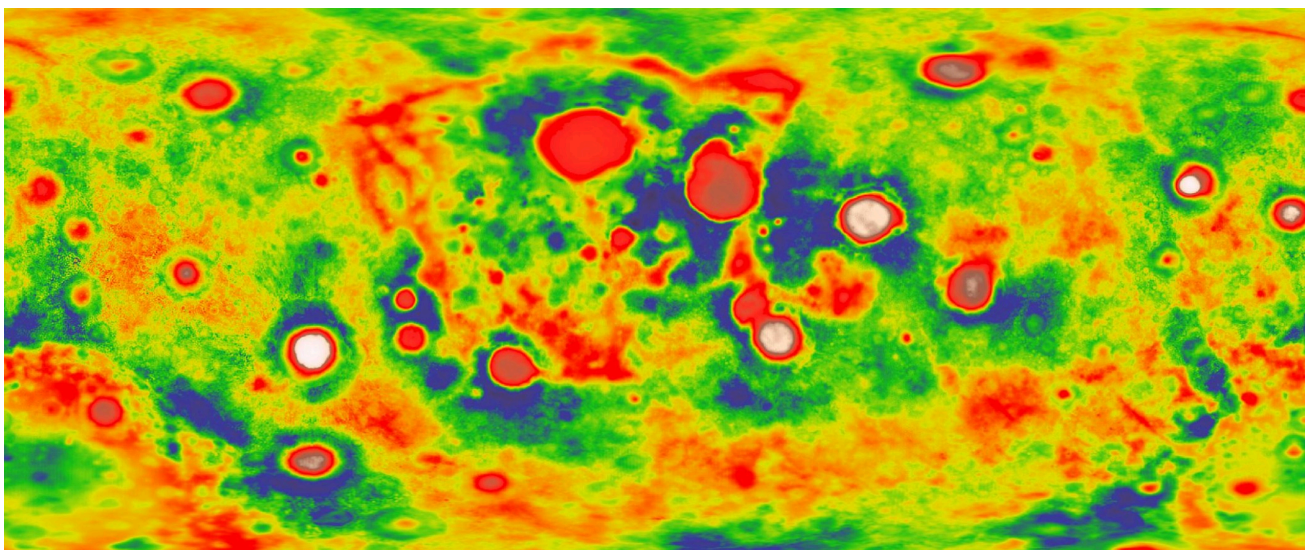
איור 7. אזור המגע — מרכז הצד הקרוב. האזור שהיה דיסקת המגע השיוויונית של הבסיס, שנחשף רק בשחרור: ריכוזי המסה החזקים ביותר, הקרום הדק ביותר, הימות הצעירים והחלקים ביותר, בלי טבעות. קרדיט: LROC QuickMap (NASA/GSFC/Arizona State University); שכבת גרדיאנט Bouguer של GRAIL (NASA/JPL-Caltech/GSFC/MIT).



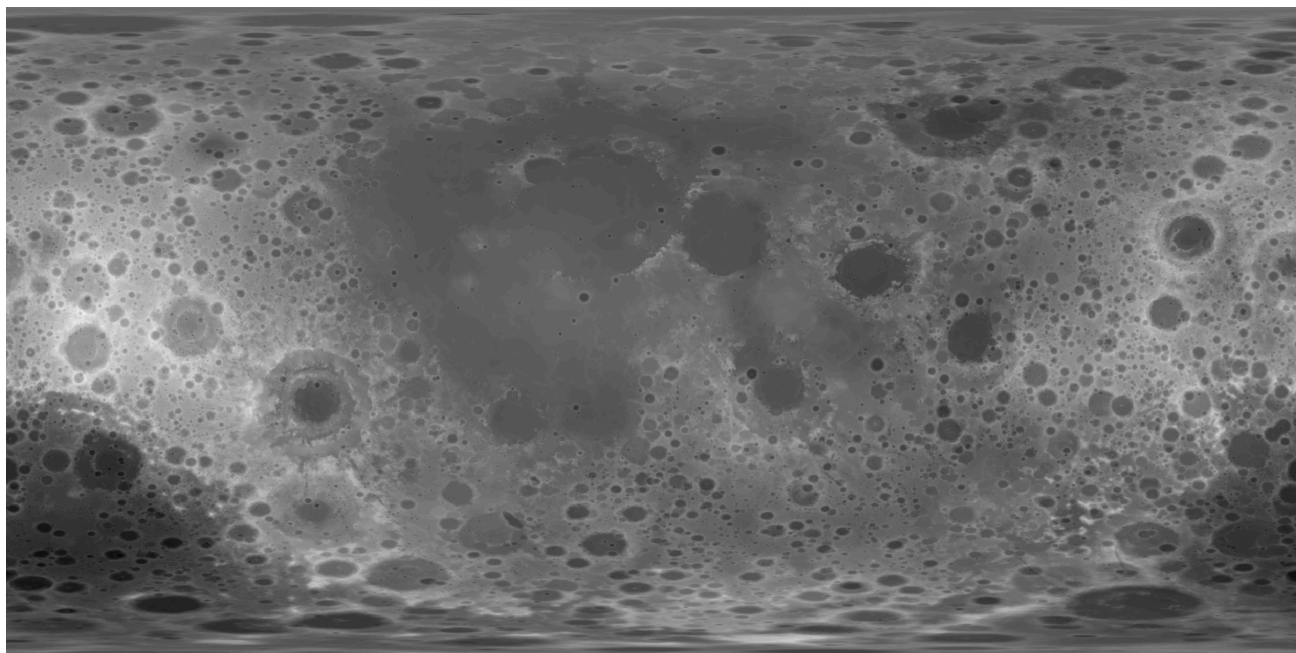
איור 8. חגורת הקצה — טבעת הבסיס. משמאל, קצה הדיסקה סביב 270°E ; מימין, סביב 90°E . אגנים עם ריכוז מסה ועם טבעת מובחנת, בשתי השפות, המזרחית והמערבית: האזור שנחשף כשהמגע הצטמק מן השוליים אל הדיסקה במהלך ההתעגלות. הופעתו בשתי השפות היא מה שחצי כדור נסגר נותן: הבסיס השתחרר לאורך כל שוליו, ולא בצד אחד בלבד. קרדיט: כמו באיור 7.



איור 9. פני השטח לשעבר של הכיפה — הצד הרחוק, ממורכז ב- 180°E , וכדור הארץ מעל קצה הדיסקה סביב 250°E – 270°E . אגנים על קרום עבה, בלי ריכוז מסה ובלי טבעת: הקרום שהיה הקליפה, שהתעבה פי שלושה בסגירה, נחשף משלב הכיפה השטוחה ונושא את הרישום העתיק ביותר. קרדיט: כמו באיור 7.



איור 10. אנומליית הכבידה של Bouguer מ-GRAIL, דרגות הרמוניות כדוריות 6–660, היטל גלילי ממורכז ב- 0°E , קווי רוחב $\pm 75^{\circ}$. הדרגות הנמוכות ביותר, השינויים הרחבים ביותר על פני הירח כולו, הוסרו כדי שתכונות בקנה מידה של אגן יבלטו. אדום ולבן: אנומליות חיוביות, ריכוזי המסה; כחול: שליליות. Orientale (משמאל, 95°W) מראה את תבנית המטרה הקלסית — מרכז חיובי בתוך טבעת שלילית — החתימה של אגן טבעתי של החגורה (T3); Serenitatis ו-Imbrium במרכז חיוביים בלי טבעת שלילית מובחנת (T4). קרדיט: LROC QuickMap (NASA/GSFC/Arizona State University); Bouguer של NASA/JPL-GRAIL (Caltech/MIT; Zuber et al. 2013).



איור 11. הגובה הגלובלי של הירח (SLDEM2015, Kaguya TC + LOLA), היטל גלילי ממרכז ב-0°E: כהה הוא נמוך, בהיר הוא גבוה. הימות וקרעיות האגנים בצד הקרוב הם השקעים; הרמות של הצד הרחוק בשני שולי המפה הן הגבהים, והן נושאות את אוכלוסיית המכתשים העתיקה ביותר של הירח — שנישאה כלפי מעלה על הקליפה ונדחסה איתה, צפופה מזו של הצד הקרוב בשל סגירת הכיפה (מאמר 3, B.6§; מבחן T2), ומכתשיה נישאו שלמים ובגודלם (מאמר 7). קרדיט: LROC QuickMap (NASA/GSFC/Arizona State University); SLDEM2015 (Barker et al. 2016, NASA/GSFC/JAXA).

כישלון: כל אחד מ-T1–T3 מתחת לקו ההפרכה שלו, או כישלון של T5. **מצב:** פתוח; זו התצפית שהייתה מסיימת את המודל (מאמר 1). החלופה שיש להשוות אליה היא אנומליה תרמית והרכבית אחת שמרכזה ב-Procellarum [S4] — אזור גדול בצד הקרוב שהיה חם יותר ועשיר יותר ביסודות מפיקי חום משאר הירח. אנומליה כזאת חוזה ניגוד בין הצד הקרוב לצד הרחוק, אך לא את חגורת הקצה שבתווך ולא את ריכוז האגנים הטבעתיים בה. חגורת הקצה היא אפוא התכונה שמבדילה בין שני ההסברים: ניגוד דו-צדדי צפוי בשניהם, ואזור שלישי, ביניים, עם סוג אגן משלו — רק בסדר החשיפה של המנגנון.

מה שיש לנו עכשיו: הציר החזוי מסדר את קרום הירח טוב יותר מכל ציר בקרה (T5), צפיפויות המכתשים העתיקים נופלות בסדר החזוי וכל יחס מעל סף המעבר שלו (T2), וסידור העובי קיים בכל ארבעת מודלי GRAIL, עם ניגוד בין הצד הרחוק לדיסקת המגע של 9.65, 10.0, 10.3 ו-10.6 ק"מ: T1 לא עבר, ובמודל 1 הוא נמצא 0.35 ק"מ מתחת לקו ההפרכה שלו עצמו (T1). על הגאומטריה הנוכחית הסידור מתקיים בשני הגדלים. מבחני האגנים T3 ו-T4 עדיין ממתנים להרצה.

B.9 תוצאות המבחנים במקום ציון מצטבר

חלק B העמיד עד כאן כל אחת משמונה הדרישות מול המדידות. הצעד הטבעי הבא היה לחבר את התוצאות למספר אחד — כך וכך שורות נתמכות, כך וכך פתוחות — ולקרוא את הסכום כסיכוי של המודל להיות נכון. סעיף זה מסביר מדוע המאמר אינו עושה זאת, ובמקום זה מציג את מצבה של כל דרישה בטבלה אחת: מה הנתונים כבר תומכים בו, ומה עוד נותר להשלים.

לטבלה שלוש עמודות. הראשונה מציינת את הדרישה (R1–R8 מחלקים A ו-R9–R18; B מחלק C שלהלן). השנייה מציינת מה נתמך היום; השלישית את החישוב או המדידה שעדיין נדרשים כדי שהדרישה תיחשב מבחן שהושלם. שורה בטבלה אינה אפוא פסק דין, אלא מיקום בדרך מ"נדרש" אל "נבדק".

דרישה	מה נתמך	מה עוד לא הושלם
-------	---------	-----------------

R1 מקור ארצי	דמיון איזוטופי משמעותי במערכות שנמדדו	מאזן רב-מערכתי של מקורות ותהליכים
R2 מעט מתכת	נתוני הפנים תואמים ליבה קטנה	חישוב של העברת המתכת ושל הפרדתה
R3 אסימטריה	קרום אסימטרי ופעילות בזלתית לא אחידה	פרופיל כמותי ומאזן מקור-קרום
R4 כיוון	הסינכרוניות של היום	רציפות כיוון החיבור לאורך ההתפתחות
R5 סדר השימור	היסטוריות של התגבשות, של פגיעות ושל פעילות מאוחרת	השוואה של יחידות שמודדות את סדר הסגירה
R6 חומרים נדיפים	מים במאגמות פנימיות שנדגמו	ריכוז ומצב פאזה שמספיקים לבנייה
R7 מרכז המסה	היסט לעבר הצד הקרוב; סימן תואם בדוגמת הקרום	פתרון משותף לגודל, לכיוון ולמבנה
R8 אזורי החשיפה	T5 עבר (מתאם דרגות של +0.87 סביב הציר החזוי, בכל ארבעת המודלים); T2 עבר (1.34 / 2.21 / 1.65); T1 לא עבר (הצד הרחוק פחות דיסקת המגע 9.65, 10.0, 10.3, 10.6 ק"מ במודלים 1-4: מודל 1 נמצא 0.35 ק"מ מתחת לקו ההפרכה של 10 ק"מ, מודלים 2-4 בין הקווים; הסידור מתקיים בכל הארבעה)	T2 על אוכלוסייה שנבחרה לפי גיל; T3 T4-ו
R9-R15, האגס	R15 עבר (צפיפות בקטבים 1.09 → 1.53 לפי גודל, מאמר 7)	R9-R14 מנוסחות עם המבחנים שלהן ב-C.6§
R16-R18, אחרי האגס	R16 נתמכת (קרקעית הימות: 0.8 מכתשים חדים בקוטר 20 ק"מ ומעלה למיליון קמ"ר, לעומת 18.3 במישורים ו-207 ברמות, מאמר 6); R17 נתמכת (מאמר 8, איור C.1)	R18 מנוסחת עם המבחן שלה ב-C.7§

טבלה: מצב הדרישות R1-R18 — מה נתמך ומה עוד לא הושלם.

קריאת הטבלה. שבע השורות הראשונות הן הדרישות המקוריות: לכל אחת יש תמיכה תצפיתית, ולכל אחת עדיין חסר החישוב האחד שיהפוך התאמה למבחן (הוא מצוין בעמודה השלישית, ומרוכז, יחד עם מה שיפריך כל אחת, ב-D.3§). שורה R8 נושאת את הדרישה היחידה של חלק B שכבר הורצה כמבחן סטטיסטי עם ספים שנקבעו מראש (B.8§). כדאי לקרוא את שלושת המספרים שלה פעם נוספת. T5 שואל אם הקרום מסודר סביב הציר הפונה אל כדור הארץ טוב יותר מאשר סביב צירי ביקורת: מתאם דרגות של +0.87 פירושו שמחגורה לחגורה, החוצה ממרכז הצד הקרוב, הקרום מתעבה כמעט בלי יוצא מן הכלל, ושום ציר ביקורת אינו מגיע לכך. T2 משווה את צפיפות המכתשים הגדולים בשלושת האזורים: בצד הרחוק הצפיפות גדולה פי 1.34 מזו של חגורת הקצה ופי 2.21 מזו של דיסקת המגע, ובחגורת הקצה פי 1.65 מזו של הדיסקה — הסדר שהמודל חוזה. T1 מוצא את אותו סדר בעובי הקרום בכל ארבעת מודלי GRAIL, עם ניגוד בין הצד הרחוק לדיסקת המגע של 9.65, 10.0, 10.3 ו-10.6 ק"מ, מול קו מעבר של 15 ק"מ וקו הפרכה של 10 ק"מ: במודל 1 ההפרש נמצא 0.35 ק"מ מתחת לקו ההפרכה, ומודלים 2-4 נמצאים בין הקווים (10.0 על הקו). T1 אפוא לא עבר; במודל 1 הוא עונה

על קריטריון ההפרכה שלו עצמו ב-0.35 ק"מ (גרסה קודמת מיקמה את הניגוד מעל קו ההפרכה ודיווחה על T1 כפתוח). שתי השורות האחרונות מסכמות את חלק C: מתוך עשר הדרישות שנוספו שם, ל-R15, ל-R16 ול-R17 כבר יש תמיכה מדודה ממאמרים 6, 7 ו-8, והשאר מנוסחות עם המבחן שיכריע בהן.

מדוע השורות אינן מחוברות. R3 ו-R7 קשורות לאותה התפלגות של חומר. גם כיסוי הימות וחלק מרשומת הגילים מושפעים ממנה. לכן אסור לצרף את המשקל הראייתי שלהן כאילו היו ניסויים בלתי תלויים, ואין לחשב "הסתברות הצלחה" ממספר השורות התואמות בלבד. הסיבה פשוטה. קרום עבה בצד הרחוק (R3) ומרכז מסה המוסט לעבר הצד הקרוב (R7) אינם שתי עובדות נפרדות על הירח: השנייה נובעת מן הראשונה, משום שקרום קל המחליף מעטפת צפופה בצד אחד מזיז את המסה לעבר הצד האחר (A.7§). הימות, הממלאים את הקרום הדק של הצד הקרוב, והמשטחים הצעירים יותר שהם נושאים, הם מבט שלישי על אותה התפלגות. לספור אותם כשלוש הצלחות דומה לשקילת חבילה אחת על שלושה משקלים ולדיווח על שלושה משקלים בלתי תלויים. ציון הבנוי משורות היה גם מסתיר את ההבדל בין שלושת סוגי התוצאות שהמאמר מקפיד להפריד ביניהם (מבוא): תוצאה הנגזרת ממשוואות, התאמה בדיעבד, ותחזית שעדיין לא נבדקה. הטבלה מדווחת אפוא על כל דרישה במונחיה שלה, והקורא שופט את המודל לפי המבחנים שיכולים להפריך אותו.

חלק C — חתימות נוספות של העלייה ושל החיבור

חלקים A ו-B עסקו בשבע הדרישות הקלאסיות ובאזורי החשיפה של R8 — תכונות שכל תיאוריה של מוצא הירח חייבת להסביר. חלק C פונה לחתימות שרק הדרך של LEF חוזה: רשומת המכתשים שנישאה למעלה על הקליפה (C.1), המקום בכדור הארץ שממנו עלה הירח והמקום בירח שבו נשאר מחובר (C.2), הפתחים שדרכם עבר החומר (C.3), אופן השחרור (C.4), המבנה העמוק שנשאר מאחור (C.5), והדרישות שנוספו בעקבות האגס של מאמר 3 ובעקבות המאמרים שבאו אחריו (C.6–C.7). כמה מאלה נשענים על קריאת מפות, והחלק מציין לכל אחד את המבחן שיפריד בין הקריאה של המודל לבין קריאות אחרות.

הבעיה

מראה מתאים בתמונה יכול לקבל כמה פירושים. **הגישה:** לשמור את התצפיות של המחבר כבסיס להשערות, ולהגדיר מבחנים שמפרידים בין הפירושים האפשריים.

C.1 המכתשים כרשומה שעלתה עם הקליפה

השאלה של סעיף זה היא מה קרה למכתשים שנוצרו על הקליפה לפני שהירח היה כדור. במאמר 3 חלק מאוכלוסיית המכתשים נוצר על הקליפה בזמן ששכבה שטוחה מעל ההזנה ועל צלע הכיפה העולה, ונישא עם הקליפה כשהכיפה עלתה ונסגרה. הקליפה כאן היא הקרום החיצוני של גוף האם מעל אזור המקור, שעלה כעורו של הגוף הגדל והפך לקרום שלו (A.3§). משום שהקליפה הייתה קשיחה, המכתשים שעליה נעו איתה, כמו סימנים על יריעה הנעים איתה כשמרימים אותה.

הסגירה אוספת רשומה קיימת אל שטח קטן יותר, ומאמר 7 מדד מה הדבר עשה למכתשים: הקליפה הקשיחה נשאה אותם שלמים ושמרה על גודלם, ואילו ההתעגלות של הגוף המחובר דחסה אותם זה אל זה. בקטבים, הקוטר החיצוני של המכתשים גדול פי 1.06 מזה של החגורה המשוונית באותו סף גודל; ארבעה מתוך חמישה מבחני גודל מוצאים שהגודל נשמר, ואף אחד אינו מוצא הצטמקות. הצפיפות, לעומת זאת, עולה עם גודל המכתש, מ-1.09 בטווח 20–30 ק"מ ל-1.53 בטווח 60–100 ק"מ (C.6§, R15) — המכתשים הגדולים והוותיקים יותר היו קיימים לאורך חלק גדול יותר של ההתעגלות ונדחסו יותר. הרשומה נדחסה, היא לא הצטמקה. כלל מוקדם יותר של מאמר 3 — מכתש על הכיפה השומר על מעגליותו בזמן שהוא מצטמק עד 0.58 מקוטרו, ואוכלוסייה המתצפפת עד פי 3 — בוטל בעקבות מבחני הגודל של מאמר 7.

הצד הרחוק נשא את הקליפה ואת מכתשיה; חגורת הקצה ודיסקת המגע שכבו מתחת לבסיס וקיבלו מכתשים רק אחרי חשיפתן, מאוחר יותר. התחזית הנובעת מכך היא שהמכתשים הוותיקים צפופים ביותר בצד הרחוק, פחות צפופים בחגורת הקצה והכי פחות צפופים באזור המגע (cap). זה הסדר ש-T2 בודק ב-B.8§. מדובר באוכלוסייה שיש לזהות, לא בטענה שכל מכתש הנראה היום נוצר בשלב ההוא.

שימור המעגליות דורש גבול לעיוות הלא אחיד; צורה מעגלית אינה מבטלת את המאמץ. הגאומטריה פשוטה. דחיסה אחידה מקטינה מעגל בלי להפוך אותו לאלילפסה, ואילו גזירה או מתיחה בכיוון מסוים משנות את צורתו; סגירת כיפה היא מן הסוג הראשון. מכתש עגול על קרקע ותיקה בצד הרחוק הוא אפוא מה שהמודל מצפה לו, ומכתש מוארך בכיוון מועדף היה מצביע על היסטוריה אחרת. כדי שהקליפה תשמור על מכתשיה בכלל, אסור לה לזרום בסקלת הזמן של העלייה. צמיגות מודדת את התנגדותו של חומר לזרימה — לדבש צמיגות גבוהה מזו של מים, ולזכוכית קרה צמיגות גבוהה בהרבה מזו של דבש. מאמר 3 מגדיר את האילוץ הראולוגי: קליפה של $\geq 10^{23}$

Pa-s לאורך העלייה, קשיחה דיה כדי להחזיק את צורת המכתש בזמן שהכיפה נסגרה מתחתיה. דחיסה טבעתית הנישאת בשפת מכתש — הלחיצה שטבעת חשה כשפני השטח סביבה נמשכים פנימה — נשארת תחזית מכנית, ויש להבחין בינה לבין סדקים שנוצרו בנחיתות מאוחרות יותר ובשקיעה מאוחרת.

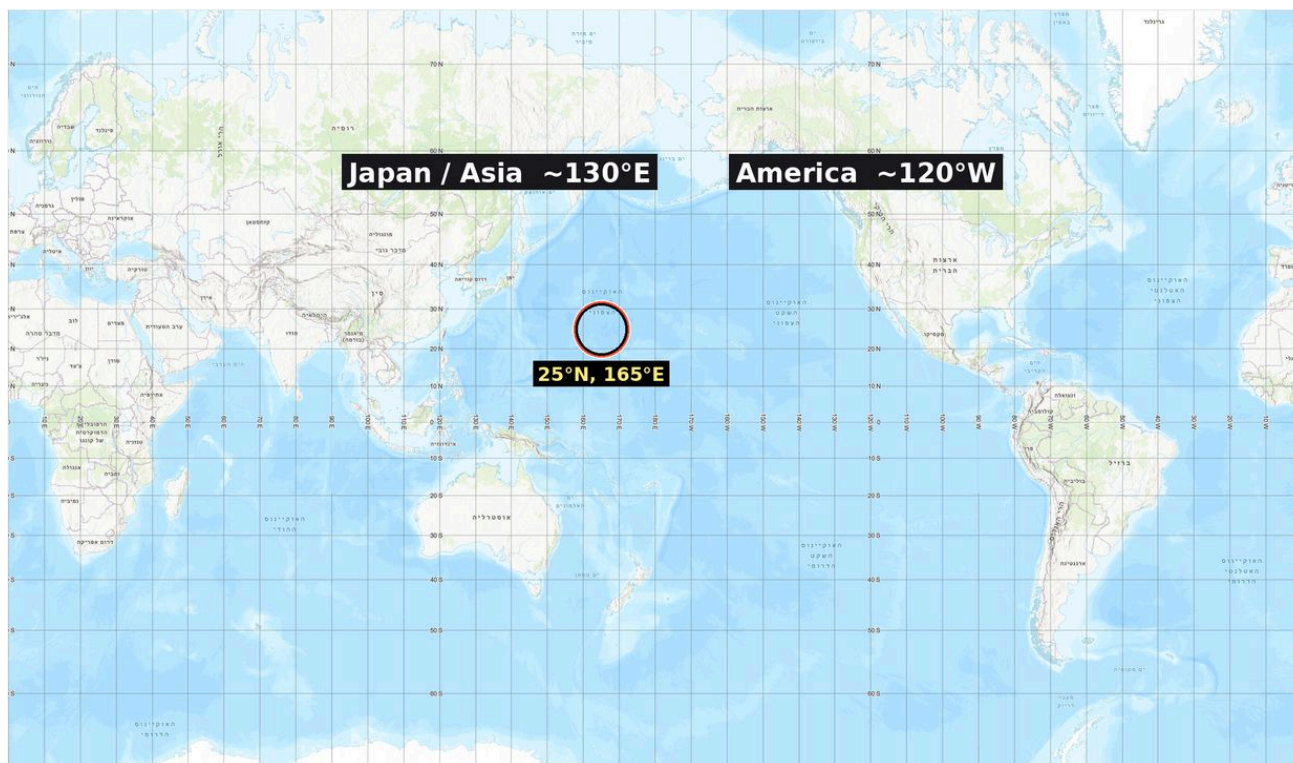
מבחן: לבחור אוכלוסיות לפי גיל יחסי ולפי מידת השימור, למדוד צפיפות שטחית, התפלגות קטרים ואליפטיות, ולהשוות לפי המרחק הזוויתי ממרכז הצד הקרוב, תוך בקרה על קבורה בבזלת; המודל מצפה שהאוכלוסייה בצד הרחוק (הוותיקה יותר) תהיה צפופה מזו של חגורת הקצה לפחות פי 1.3, לא קטנה ממנה בקוטר החציוני, ומעגלית. היעדר מכתשים על מילוי צעיר אינו כשלעצמו צלקת של החיבור. מקור החומר החוזר ואנרגיית הנחיתה שלו שייכים למאמר 6, וישלימו בנפרד.

c.2 אזור מקור ארצי ונקודת חיבור ירחית

אם הירח עלה מכדור הארץ, יש לנקוב בשני מקומות: היכן בכדור הארץ הוא עלה, והיכן בירח הוא נשאר מחובר עד הסוף. סעיף זה מציג את הקריאה של המודל לשניהם, ומציין מה יבחן אותה.

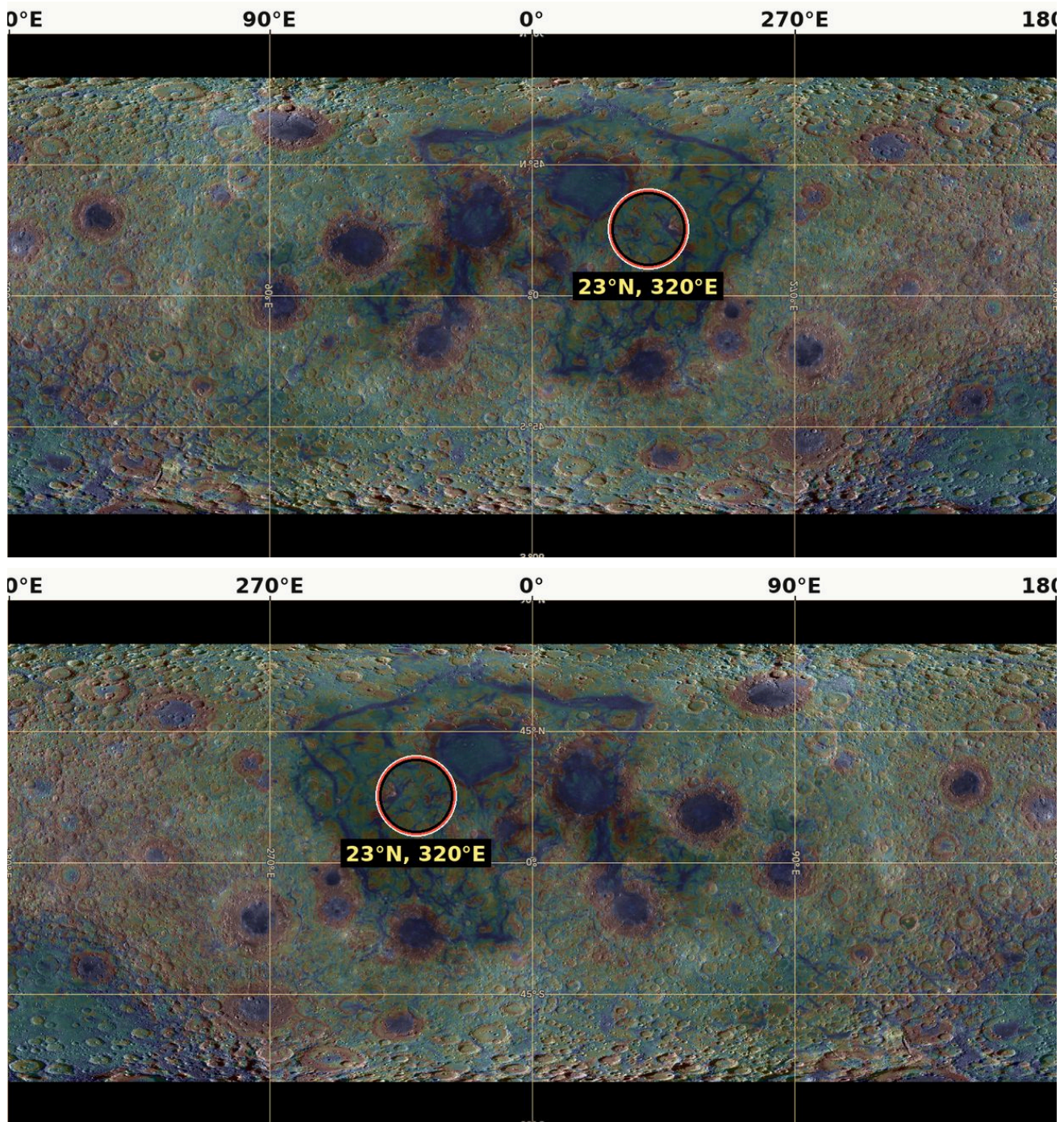
המודל מציב את בסיס האגס, עם פתחיו, ליד Kiritimatı שבאיי Line של Kiribati, בערך 1.9° צפון ו- 157.5° מערב, מעל ה-LLVP של האוקיינוס השקט. LLVP (אזור איטי גדול במעטפת התחתונה) הוא אחד משני אזורים בגודל של יבשת בתחתית המעטפת של כדור הארץ, ממש מעל הליבה, שבהם גלים סייסמיים נעים לאט יותר מאשר במעטפת שסביבם; אחד שוכן מתחת לאוקיינוס השקט והאחר מתחת לאפריקה, ושניהם נקראים כחומר חם יותר מסביבתו או שונה ממנה בהרכבו. האגס נטה לאחור, מערבה, וצפונה, מעל מרכז-צפון האוקיינוס השקט, שם הקריאה המוקדמת של המחבר, בערך 25° צפון ו- 165° מזרח, מסמנת את גבו (מאמר 3, B.1§). מאמר 9 (הפסים) מוסיף את קצה האגס, המקום שבו נוצר הירח: מרכזו סמוך ל- 9.3° צפון ו- 169.3° מזרח, כ-3,760 ק"מ מערבית לבסיס Kiritimatı (3,770 ק"מ בגרסה קודמת), והוא תחום בין שני כיפופים של הפסים שהמרחק ביניהם 3,360 ק"מ. בקריאה זו, הפסים של צפון האוקיינוס השקט הם הצד הקדמי של האגס, שקופל כשהאגס נפל חזרה אל כדור הארץ.

בירח, מרכז הגבעה שממנה נבנה הגוף סמוך ל- 16.6° צפון ו- 13.1° מזרח, והמגע האחרון סמוך ל- 24.1° צפון ו- 335.2° מזרח, ובתוכו Mare Imbrium, פתח ההזנה (מאמר 3, B.4§); Imbrium הוא היציאה הראשית, ו-Mare Serenitatis היציאה המשנית. הקריאה המוקדמת של המגע, בערך 23° צפון ו- 320° מזרח, נשמרת באיור 13 לשם השוואה. אלה זיהויים גאומורפולוגיים, לא קואורדינטות פליאוגאוגרפיות ששוחזרו באופן בלתי תלוי (איורים 12 ו-13): הם נקראים מצורות הקרקע של היום, ולא משוחזרים מן המיקומים הקדומים של הלוחות. קיומו של קרום אוקייני היום אינו מוכיח שבזמן היווצרות הירח הייתה שם קליפה סיאלית רציפה ושהיא עלתה ממנו. סיאל הוא השכבה העליונה הקלה של קרום מטיפוס יבשתי, עשירה בצורן ובאלומיניום; מתחתיו נמצאת הסימה, שכבה צפופה יותר העשירה בצורן ובמגנזיום, מן הסוג שמרצף את האוקיינוסים ועובר כלפי מטה אל המעטפת.



איור 12. אזור המקור. האזור המסומן, שמרכזו סמוך ל-25° צפון, 165° מזרח, במרכז-צפון האוקיינוס השקט, הוא גב האגס, הנוטה מערבה; בסיסו שכן ממזרח, ליד Kiritimati (1.9° צפון, 157.5° מערב); הקצה, לפי מאמר 9, נמצא סמוך ל-9.3° צפון, 169.3° מזרח. האזור שוכן בין השוליים הפונים אל אסיה (כ-130° מזרח) לבין השוליים הפונים אל אמריקה (כ-120° מערב). קרקעית הים של היום צעירה מ-180 מיליון שנה; הקריאה מתייחסת לאסימטריה המיספרית של הליתוספירה שמתחתיה (מאמר 3, B.1§). קרדיט: מפת בסיס, © Google Maps, Google; סימונים של המחבר.

איור 12 מציג את צד כדור הארץ של הקריאה: גב האגס במרכז-צפון האוקיינוס השקט, והבסיס ממזרח לו. קרקעית הים של היום שם צעירה, ולכן האיור אינו טוען שהקרקעית עצמה היא שריד של היווצרות הירח; הקריאה נוגעת לאסימטריה של הליתוספירה העמוקה יותר שמתחתיה.



איור 13. המגע בירח. הקריאה המוקדמת של המגע, כ-23° צפון, 320° מזרח, על מפה גלילית שמרכזה ב-180° מזרח (משמאל) וב-0° מזרח (מימין); המגע כפי שסומן מאוחר יותר בידי המחבר ממורכו ב-24.1° צפון, 335.2° מזרח (מאמר 3, §B.4), כש-Imbrium היציאה הראשית ו-Serenitatis המשנית, קרוב לקו הרוחב שממנו יצא הירח, 22.5° (מאמר 4). קרדיט: LROC (NASA/JPL-QuickMap (NASA/GSFC/Arizona State University); שכבת גרדיאנט Bouguer של GRAIL (NASA/JPL-Caltech/GSFC/MIT).

איור 13 מציג את צד הירח, פעמיים: פעם כשהצד הרחוק במרכז המפה ופעם כשהצד הקרוב במרכזה. הנקודה שיש לשים לב אליה היא קו הרוחב. המגע נמצא סמוך ל-24° צפון, ומאמר 4 מוצא שהירח יצא מקו רוחב 22.5°; נקודת מגע שמוקמה בקריאת פני השטח וקו רוחב של שחרור שנגזר מן המסלול מתאימים זה לזה בטווח של מעלות ספורות.

המיפוי בין שני האזורים הוא כלל התרגום של מאמר 3: שטח הפנים נשמר עד כדי דחיסה אחידה, כך ששפת בסיס הכיפה הופכת לקצה הדיסקה של היום, המגע הופך לכיפה בצד הקרוב שרדיוסה כ-41° בכלל של מבחני

ספטמבר (31° בכלל הנוכחי של מאמר 3, B.88), והכתר הופך לצד הרחוק. במילים פשוטות, הכלל אומר היכן נמצא היום, על הירח העגול, כל חלק של הגוף המחובר: מה שנגע בכדור הארץ פונה אל כדור הארץ, שפת הבסיס הפכה לשפת הדיסקה הנראית, וראש הכיפה הפך לצד הנסתר. הדמיית מראה לבדה אינה המיפוי הזה: מאמר 9 בודק טביעת מראה של פני המגע ב- $1.37 \times$, שהיא הטביעה של הפנים שבמגע, לא המיפוי של המקור כולו. יש להחיל את כלל המיפוי על המקור המשוחזר, ולהשוות את הגאומטריה המתקבלת למפת הירח.

מבחן: להגדיר מראש את גבולות אזור המקור ואזור החיבור ואת שגיאות המיקום, ואז לבחון כמה תוצרי מיפוי שאינם אותם סימנים ששימשו לבחירתם. מטרת הכלל הזה היא למנוע היסק מעגלי: תכונה ששימשה לבחירת האזור אינה יכולה להיחשב גם כראיה לכך שהאזור נכון. זיהוי האוקיינוס השקט הוא ענף תצפיתי שיש לבחון; חישוב שטח המקור במאמר 3 אינו ראיה למיקומו הקדום.

C.3 שלוש קבוצות של פתחים וטבעות

הפתחים הם המקומות שבהם נוקבה הקליפה וחומר עמוק עבר דרכה. המודל מבחין בין שלוש קבוצות של פתחים, והגאומטריה של מאמר 3 נותנת להן משמעות: פתחים על הכתר, שנחשפו ראשונים ופלטו חומר בזמן שהיו חשופים; פתחים על הצלע, שנחשפו בזמן שהכיפה עלתה; ופתחים מתחת לבסיס, שהיו מכוסים עד השחרור ושהחומר רק עבר דרכם. שלוש הקבוצות נבדלות בדבר אחד: כמה זמן כל אחת הייתה פתוחה אל החלל. פתח בכתר יכול היה לזרוק חומר החוצה במשך רוב הבנייה; פתח בבסיס היה אטום כנגד כדור הארץ ונעשה נראה רק כשהירח יצא. הסיווג עומד בעינו; עם זאת, חלוקת הימות לקבוצות אינה קביעה שכל אגן בזלתי הוא פתח. גם אחרי שהחיבור לכדור הארץ נותק, מבנים ירחיים שנצרו קודם לכן יכולים להשפיע על געשיות מאוחרת יותר שמקורה בפנים הירח.

טבעת כבידתית אינה בהכרח שפה מוגבהת. במפת כבידה טבעת היא מעגל של עודף מסה או של חוסר מסה, שעשוי לשכון מתחת לפני השטח; שפה היא מעגל של קרקע גבוהה. קביעת הראשונה דורשת נתוני כבידה ומודל צפיפות; קביעת השנייה דורשת טופוגרפיה. אין חוק כללי שלפיו רק חומר בעל צמיגות בינונית יוצר טבעת. לכן נדרשים סיווג גאולוגי, גובה השפה, המבנה התת-קרקעי וההרכב, ולא רק צבע במפת גרדיאנט כבידה.

מבחן: לקבוע את קבוצות המיקום לפני בחינת הטבעות, לפרסם רשימת אגנים מלאה ומדד גובה ביחס לסביבה, ולהשוות למודלים של פגיעה, של מילוי, של שקיעה ושל חדירה מאגמטית. אי-התאמה מפריכה את השערת הסיווג; היא אינה מבטלת את משוואת הקורוטציה. המודל בנוי ברמות: משוואת הקורוטציה של מאמר 2, שמציבה את השחרור, אינה נשענת על אופן סיווג הפתחים, ולכן כישלון ברמה הזאת מוגבל אליה.

C.4 שחרור והתעגלות

השאלה כאן היא כיצד הירח השתחרר ובאיזה מצב יצא. שני מרחקים חשובים. רדיוס הקורוטציה הוא המרחק מכדור הארץ שבו גוף המסתובב עם כדור הארץ, פעם אחת ביממה ארצית, נע בדיוק במהירות של מסלול מעגלי חופשי; בתוכו גוף משוחרר נופל חזרה, ומעבר לו הוא נישא החוצה. בזמן השחרור, עם יממה של 5.77 שעות, הוא שכן ב-16,399 ק"מ בקו המשווה, כ-2.6 רדיוסי כדור הארץ. גבול רוש הוא המרחק שבתוכו ההפרש במשיכת כדור הארץ לאורך גוף עולה על הכבידה העצמית של הגוף המחזיקה אותו יחד.

מאמר 2 מפריד בין הקורוטציה לבין השרידות הגאותית, ומאמר 3 בוחן את החיבור. השוואה של תאוצת הכבידה העצמית לגרדיאנט הגאותי יכולה לתת סקאלה הדומה לגבול רוש של גוף קשיח; היא אינה מוכיחה את קצב ההתעגלות, את כישלון החיבור או את היציבות של גוף חם. גוף יכול לשכון מעבר לגבול רוש ועדיין להיקרע אם הוא חלש או חם; ההשוואה היא סקאלה, לא היסטוריה.

הסדר קבוע בסדרה: הגוף התעגל בעודו מחובר, ובזמן השחרור הקליפה שלו הייתה קשיחה ועגולה (מאמר 7). הוא התנתק בקילוף: לאורך הבסיס של 6,000 ק"מ הסיאל שעליו ישב התקלף מן הסימה והלך איתו; לאורך

המגע של 3,000 ק"מ החום המיס את הסיאל והחליק את פני השטח; וכשמרכז המסה של הירח הגיע לקו הקורטוציה, כוחות הקורטוציה משכו לחופשי את שארית המגע (מאמר 3, C.4a§, C.5). לא היה צוואר.

קילוף היא מילת המפתח, והיא מתארת היפרדות לאורך השכבה החלשה ביותר. הגוף ישב על הסיאל של כדור הארץ, ומתחת לסיאל הייתה הסימה; הגבול ביניהן, חם ונייד, היה המשטח החלש ביותר בחיבור (טבלת הסביבה). בזמן שהגוף התעגל, הבסיס שלו התנתק לאורך הגבול הזה מן השפה פנימה, כמו רצועת סרט דביק שמורמת מקיר צבוע ולוקחת איתה את הצבע ומשאירה את הטיח: הגוף לקח את הסיאל והשאיר את הסימה. ההיפרדות צמצמה את השטח המחובר מן הבסיס של 6,000 ק"מ אל המגע של 3,000 ק"מ. שם חום ההזנה המיס את הסיאל במקום להרים אותו, והקרע הוחלף. הצעד האחרון לא נזקק למכה ולא לגבעול דק: כשמרכז המסה של הגוף הגיע לרדיוס הקורטוציה, התנועה שכבר הייתה לו עם כדור הארץ השתוותה לתנועה מסלולית, וכוחות הקורטוציה משכו את המגע שנותר והפרידו אותו.

מאמר 11 דורש לזהות בקרום ובשדה הכבידה את החתימות של הסדר הזה — חגורת קצה מקולפת, אזור מגע מוחלק שנפתח בידי הימות. הראשונה היא חגורת הקצה של R8, שבמודל נושאת את הסיאל המקולף; השנייה היא דיסקת המגע, עם הקרום הדק ביותר וריכוזי המסה החזקים ביותר שאין סביבם טבעות (איורים 6 ו-7).

5.c. האנומליה העמוקה והאסימטריה צפון-דרום

סעיף זה עוסק במה שיציאת הירח אולי השאירה בעומק כדור הארץ. הקשר בין האונה A הקדומה לבין המבנים העמוקים של היום נשאר כיוון מחקר. האונה A היא החלק של המאגר העמוק ששכן מתחת לאזור המקור והזין את הגוף העולה; המודל קורא את השריד שלה היום כ-LLVP של האוקיינוס השקט, ואת ה-LLVP האפריקני כאונה הנגדית שלא הופרעה (R11, C.6§). מהירות סייסמית נמוכה אינה מדידה ישירה של חוסר מסה, ואין במאמר הזה מודל שמוביל אנומליה מסוימת דרך מיליארדי שנים של ערבוב ושל התמיינות. גלים סייסמיים מאטים גם בחומר חם יותר וגם בחומר בעל הרכב שונה, ואזור איטי יכול להיות צפוף מסביבתו, לא קל ממנה; מפת מהירויות לבדה אינה אומרת היכן חסרה מסה. באופן דומה, את האסימטריה צפון-דרום יש לבחון אחרי הפרדת האסימטריה בין הצד הקרוב לרחוק ואחרי הפרדת ההשפעה של האגנים הגדולים; אסור להשתמש ב-SPA לבדו כדי לאמת אותה. אגן South Pole–Aitken (SPA) גדול כל כך שהוא לבדו גורם לדרום להיראות שונה מן הצפון; אות צפון-דרום חייב לשרוד גם בלעדיו.

6.c. דרישות שנוספו בעקבות האגס

מאמר 3 נותן עכשיו לחיבור את צורתו: בליטה אחת מחומרו של כדור הארץ עצמו, שנמשכה לצורת אגס המחזיק את עצמו בכבידתו שלו, שקצהו הוא הכיפה והופך לירח, ושנופל חזרה אל כדור הארץ כשהירח יוצא. התיאור הזה מציב דרישות נוספות על הירח ועל כדור הארץ. הן מנוסחות כאן באותה צורה כמו R1–R8, כל אחת עם הממצא שיפריך אותה.

האגס הוא גוף רציף אחד: בסיס רחב על כדור הארץ, גוף ההולך ונעשה צר כלפי חוץ, וקצה שבו גדל הירח. הדרישות שלו נופלות על שני הקצוות. בצד של כדור הארץ, האגס חייב להיות מסוגל לעמוד (R9), חייב לחזור בלי להשאיר פסולת במסלול (R10), וחייב היה להשאיר סימן במקום שאליו חזר (R11). בצד של הירח, קריעת הסיאל חייבת הייתה להשאיר שפה כימית (R12), הליבה חייבת לרשום עד כמה עמוק הגיעה ההזנה (R13), ושום דבר שמחוץ לכדור הארץ לא יימצא בירח (R14). R15 רושמת כיצד ההתעגלות של הגוף המחובר דחסה את המכתשים.

דרישה	מה האגס דורש	מבחן	מופרך אם
-------	--------------	------	----------

R9 — אגס בכבידתו שלו	חיבור ברוחב של כ-9,000 ק"מ על פני כדור הארץ, ההולך ונעשה צר בקשת אחת אל המגע של 3,000 ק"מ, מחזיק את עצמו בכבידתו שלו ושוכן כולו בתוך קו הקורוטציה (מאמר 3, C.7§)	צורת שיווי המשקל של כדור ארץ מסתובב, בלחץ פנימי, עם גוף בקצהו (מאמר 3, C.9§)	לא קיימת צורה המחזיקה את עצמה עבור שום צפיפות וסיבוב קבילים
R10 — האגס חוזר	כתשע מסות ירח, כ-11% ממסת כדור הארץ (מאמר 9 נותן טווח של שבע עד שתיים-עשרה), נופלות חזרה בשלמותן כשהירח יוצא; שום שארית של החיבור אינה נשארת במסלול	ערימה חוזרת, עשירה בברזל, בתחתית המעטפת מתחת לבסיס האגס; אין שריד במסלול	שריד של החיבור במסלול, או היעדר מסה חוזרת מתחת למקור
R11 — ה-LLVP של האוקיינוס השקט	בסיס האגס, ליד Kiritimati (בערך 1.9° צפון, 157.5° מערב), שוכן מעל ה-LLVP של האוקיינוס השקט, הערימה שחזרה; ה-LLVP האפריקני הוא האונה הנגדית שלא הופרעה (מאמר 3, חלק E)	מיקום הבסיס מול קו המתאר של ה-LLVP במודלים שפורסמו; ה-LLVP של האוקיינוס השקט עשיר יותר בברזל, נמוך יותר ורחב יותר מן האפריקני	הבסיס מחוץ ל-LLVP, או ששני ה-LLVP דומים בהרכב ובצורה
R12 — KREEP	השפה הקרועה של הסיאל, שקופלה פנימה בשפת הבסיס, נושאת אשלגן, יסודות אדמה נדירים וזרחן אל הצד הקרוב סביב Procellarum (מאמר 3, C.10§)	מיקום ה-KREEP מול שפת הבסיס; הרכב האנורטוזיטים הפרימיטיביים ביותר, שחייבים לאבד את האשלגן והתוריום של הסיאל הארצי	KREEP שאינו קשור לשפה, או אנורטוזיטים פרימיטיביים השומרים על חתימה סיאלית ארצית
R13 — הליבה כמד	הליבה הירחית הקטנה, אחוז עד שניים מן המסה, מודדת עד כמה קרבה ההזנה אל הברזל היורד (מאמר 3, C.10; R2§)	מודל הובלה של ברזל בהזנה העולה, עם עומק המקור	חלק ליבה שמחייב מקור בליבת כדור הארץ, או חלק ליבה ללא ברזל כלל
R14 — אין חומר זר	הירח בנוי מכדור הארץ בלבד: אין בו רכיב מגוף פוגע	מאזן איזוטופי רב-מערכתי (R1), ובזלות פלומה מן ה-LLVP של האוקיינוס השקט הנושאות את החתימה של כדור הארץ עצמו (מאמר 3, E.4§)	רכיב לא-ארצי מובחן בירח בכללותו או בפלומות של האוקיינוס השקט

R15 — צפיפות בקטבים לפי גודל	ההתעגלות של הגוף המחובר דחסה את המכתשים בקטבים, ככל שהם ותיקים וגדולים יותר — יותר (מאמר 7)	היחס הנקי בין הקטבים לקו המשווה לפי גודל המכתש, כשהימות ו—South Pole Aitken מוסרים: 1.09 בטווח 30–20 ק"מ, העולה ל-1.53 בטווח 100–60 ק"מ	היחס אינו עולה עם גודל המכתש מעל 20 ק"מ
------------------------------	---	---	---

טבלה: הדרישות R9–R15 שהאגס מוסיף — מה נדרש, המבחן, ומתי הדרישה מופרכת.

R15 כבר נמדדה ועוברת (מאמר 7, D.1–D.2§). R10, R11 ו-R14 חולקות את צד כדור הארץ של התיאור: מה עלה ומה חזר, והיכן הוא נמצא היום.

קריאת השורות. R9. האגס אינו מוחזק בחוזק החומר שלו — שום חומר אינו חזק דיו בקנה מידה כזה — אלא, כמו הבליטה המשוונית של כדור הארץ עצמו, באיזון בין הכבידה שלו, הלחץ הפנימי והסיבוב. צורה מאוזנת כזאת נקראת צורת שיווי משקל. הדרישה היא שתתקיים צורה מן הסוג הזה, ברוחב 9,000 ק"מ בבסיס וההולכת ונעשית צרה אל המגע של 3,000 ק"מ, כשכל חלק שלה בתוך קו הקורטוציה: בתוך הקו הזה כל חלק מסתובב לאט יותר ממהירות מסלולית ונשאר קשור לכדור הארץ, כך שרק הקצה, כשהוא מגיע לקו, משתחרר. המודל נכשל אם שום צפיפות ושום סיבוב בתחום הקביל אינם נותנים צורה כזאת.

R10. כשהקצה יוצא, שאר האגס — כתשע מסות ירח — אינו מוחזק עוד בחוץ ונופל חזרה אל כדור הארץ. משום שכולו שכן בתוך קו הקורטוציה, שום חלק ממנו אינו יכול להישאר במסלול. המבחן מחפש לאן הוא הלך: ערימה של חומר חוזר עשיר בברזל בתחתית המעטפת מתחת למקור. האגס, שנבלע בכדור הארץ, השאיר גם קמטים: הפסים בצדו הקדמי והקשתות המקומטות בגבו (מאמר 9); המבחנים של מאמר 9 מפורטים שם (חלק G), ואינם ממוספרים כאן כדרישה.

R11. הערימה שחזרה מזוהה עם ה-LLVP של האוקיינוס השקט. לכן המודל דורש שבסיס האגס, כפי שהוא נקרא מפני השטח ליד Kiritimati, ישכון מעל ה-LLVP הזה, ושה-LLVP של האוקיינוס השקט יהיה שונה מן האפריקני, שהמודל קורא כאונה הנגדית שלא הופרעה: עשיר יותר בברזל, נמוך יותר ורחב יותר. המבחן משווה את הבסיס לקו המתאר של ה-LLVP במודלים הסייסמיים שפורסמו לתחתית המעטפת.

R12. KREEP הוא רכיב של חומר ירחי העשיר באשלגן (הסמל הכימי K), ביסודות האדמה הנדירים (REE) ובזרחן (P), יחד עם תוריום ואורניום. היסודות האלה אינם נכנסים בקלות לגבישים של מינרלים נפוצים, ולכן מתרכזים בנוזל האחרון שמתמצק; בכדור הארץ הם מרוכזים בקרום היבשתי, הסיאל. בירח, KREEP מרוכז בצד הקרוב סביב Oceanus Procellarum. המודל קורא אותו כשפה הקרועה של הסיאל, שקופלה פנימה בשפת הבסיס כשהגוף התקלף. אנורתוזיט הוא חומר קל העשוי כמעט כולו מן המינרל פלגיוקל, והוא בונה את הרמות של הירח; האנורתוזיטים הירחיים הפרימיטיביים ביותר עניים מאוד באשלגן ובתוריום. אם מקורם בסיאל של כדור הארץ, היסודות האלה חייבים היו לעזוב אותם — אל השפה המקופלת. המודל נכשל אם ל-KREEP אין קשר לשפת הבסיס, או אם האנורתוזיטים הפרימיטיביים שומרים על החתימה של הסיאל.

R13. הליבה הירחית קטנה, אחוז עד שניים ממסת הירח (R2). במודל היא מודדת עומק: ההזנה עלתה דרך אגס שאליו ירד הברזל של כדור הארץ, וככל שהמקור היה קרוב יותר לברזל הזה, כך קיבל הירח יותר מתכת. הליבה הקטנה אומרת שההזנה התקרבה אל הברזל היורד, אבל לא באה מליבת כדור הארץ עצמה. מודל הובלה של ברזל בהזנה העולה חייב לשחזר את החלק הזה; ליבה שמחייבת מקור בליבת כדור הארץ, או ליבה בלי ברזל כלל, מפריכה את הדרישה.

R14. במודל הפגיעה הענקית, הירח מכיל חומר של הגוף הפוגע, גוף מחוץ לכדור הארץ. ב-LEF הירח הוא חומר של כדור הארץ בלבד. המבחן כפול: המאזן האיזוטופי של R1, והבזלות של הפלומות — עמודים של

מעטפת חמה העולים מן העומק — שעולות מן ה-LLVP של האוקיינוס השקט, שבמודל הוא האגס שחזר וצריך לשאת את החתימה של כדור הארץ עצמו. רכיב לא-ארצי מובחן באחד המקומות האלה מפריך את הדרישה.

R15. בקטבים יש יותר מכתשים ליחידת שטח מאשר ליד קו המשווה, והעודף גדל עם גודל המכתש: 1.09 למכתשים של 20–30 ק"מ, 1.53 למכתשים של 60–100 ק"מ. היחס "נקי": הימות, העניים במכתשים, ו-South Pole–Aitken מוסרים משני צדי ההשוואה, כך שמשווים דומה לדומה. במודל המכתשים הגדולים יותר הם הוותיקים יותר; הם היו על הגוף לאורך חלק גדול יותר של התעגלותו ונדחסו יותר. זו הדרישה היחידה של C.6 שכבר נמדדה, והיא עוברת.

C.7 דרישות שנוספו אחרי האגס

שלושה מאמרים שנסגרו אחרי האגס מוסיפים שלוש דרישות: הימות כפתחים (מאמרים 5 ו-6), הסימן בצד הרחוק של החום שעבר דרכם (מאמר 8), ואותו רעיון במאדים (מאמר 10). כל אחת לוקחת חלק של המודל שכבר תואר — הפתחים של C.3, חום ההזנה, ירח העשוי מפנים כוכב האם שלו — ומבקשת את עקבתו במקום שבו אפשר למדוד אותה.

דרישה	מה נדרש	מבחן	מופרך אם
R16 — 34 הימות הם הפתחים	הימות הם 34 פתחים מעל כיפות הזנה בצד הקרוב (מאמר 5, נספח A); המישורים הכהים — המישורים הכהים — Procellarum, Tranquillitatis ודומיהם — הם קרום שהותך במקומו, לא ימות. החומר החוזר שיצר את המכתשים יצא דרך הפתחים, ומכתשים שנחתו על קרקעית ים פעילה נמסו (מאמר 6)	מכתשים חדים בקוטר 20 ק"מ ומעלה על קרקעיות הימות לעומת המישורים והרמות, על 34 טביעות הרגל; החלק שנמס לפי גודל ולפי זמן הנחיתה	קרקעיות ימות עשירות במכתשים חדים כמו מישורים באותו גיל; מכתשים על הקרקעיות שלא נמסו אלא נקברו מתחת לזרמים מאוחרים
R17 — שתי יציאות וכיפה מדרום להן	לחום שמתחת לצד הרחוק היו שתי יציאות, מול Imbrium (ראשית) ו-Serenitatis (משנית). מרכז הכיפה, מינימום המכתשים והמרכז החם שוכנים מדרום לשתייהן: הכיוון נקבע בידי מיקום האגס ובידי כוחות הסיבוב של כדור הארץ, הדוחפים את הזרימה בניצב לציר הסיבוב, וההתעגלות של הגוף המוארך הגדילה את המרחק (17–21° בשלב הפחוס, 24–29° היום) (מאמר 8, C.3–C.4§)	המרכזים של SPA על מפה אחת: יציאות בצפון וכיפה קטנה של קרום דק מעל כל אחת, הכיפה והמינימום באמצע, המסה הצפופה והקרקע הנמוכה ביותר בדרום (מאמר 8, איור C.1)	חוסר מכתשים ומרכז של קרום דק שאינם קשורים לנקודות שמול הפתחים בצד הקרוב, או שוכנים מצפון להן

R18 — ירחי מאדים מצינור משווי אחד	שני הירחים נורו כפקקים של קרום מאדים מצינור אחד ב-Pavonis Mons (1.48° צפון, 247.04° מזרח), על קו המשווה, בכוח גז כלוא, והשלימו את מסלוליהם בטבעת של אדי מים מעובים (מאמר 10, C-G§)	ההרכב של Phobos מול הקו של מאדים; גירעון מסה מתחת ללוע של Pavonis; הנטיות של שני הירחים, בטווח 2° מקו המשווה	Phobos מחומר שאינו של מאדים או עם רכיב של גוף פוגע; עודף מסה מתחת ללוע
-----------------------------------	--	--	--

טבלה: הדרישות R16–R18 שנוספו אחרי האגס — מה נדרש, המבחן, ומתי הדרישה מופרכת.

קריאת השורות. R16. ים, במודל, הוא פתח מעל כיפת הזנה — מקום שבו חומר עמוק עבר דרך הקליפה — ומאמר 5 מונה 34 כאלה בצד הקרוב. המישורים הכהים הרחבים כמו Procellarum ו-Tranquillitatis אינם פתחים אלא קרום שהותך במקומו. משום שהפתחים היו המקור של החומר החוזר שיצר את המכתשים, ומשום שמכתש שנחת על קרקעית ים שעדיין הייתה מותכת נמס לתוכה, קרקעיות הימות צריכות להיות כמעט נקיות ממכתשים חדים, כאלה ששפתם עדיין רעננה. מאמר 6 סופר 0.8 מכתשים חדים בקוטר 20 ק"מ ומעלה למיליון קמ"ר על קרקעיות הימות, לעומת 18.3 במישורים ו-207 ברמות: על קרקעיות הימות יש פחות מכתשים כאלה מאשר במישורים, פי עשרים ויותר. הדרישה נכשלת אם קרקעיות הימות יתבררו כעשירות במכתשים חדים כמו מישורים באותו גיל, או אם המכתשים הרדודים שלהן יתבררו כקבורים מתחת לזרמים מאוחרים ולא כמותכים.

R17. החום שעבר דרך הפתחים בצד הקרוב השאיר את סימנו בצד הנגדי של הירח, ב-South Pole–Aitken (SPA). שתי היציאות של החום הזה נמצאות מול Imbrium, היציאה הראשית, ומול Serenitatis, המשנית. המודל דורש שמרכז הכיפה, האזור העני ביותר במכתשים והמרכז החם ישכנו מדרום לשתי הנקודות, משתי סיבות: מיקום האגס והסיבוב של כדור הארץ דחפו את הזרימה בניצב לציר הסיבוב, וההתעגלות של הגוף המוארך הגדילה את המרחקים בין נקודות על פני השטח — מ-17°–21° בשלב הפחוס ל-24°–29° היום. זהו שינוי של הצורה, מפחוסה לעגולה, המשנה את המרחקים בין נקודות על פני השטח; התמונה משתנה, לא מקומו של SPA. איור C.1 של מאמר 8 מציב את כל המרכזים של SPA על מפה אחת בסדר החזוי, מן היציאות בצפון אל המסה הצפופה והקרקע הנמוכה ביותר בדרום. הדרישה נכשלת אם לחוסר המכתשים ולמרכז הקרום הדק אין קשר לנקודות שמול הפתחים, או אם הם שוכנים מצפון להן.

R18. אותו רעיון, כשעוקבים אחריו במאדים בדרך אחרת, עושה את Phobos ואת Deimos ממאדים עצמו. מאדים צעיר, שרדיוסו פי 1.5 מרדיוסו היום ושהסתובב בחמש שעות, ירה שני פקקים מן הקרום שלו מצינור אחד ב-Pavonis Mons, בדחיפת גז כלוא; טבעת של אדי מים מעובים נתנה להם את המהירות הצידית שחסרה להם ומשכה את מסלוליהם אל מישור קו המשווה. גוף מתחיל במסלול הנוטה בערך כקו הרוחב של אתר השיגור שלו, ו-Pavonis ב-1.48° צפון (IAU Gazetteer of Planetary Nomenclature), הוא הקרוב ביותר לקו המשווה מבין ארבעת הרי הגעש של Tharsis; שני הירחים מקיפים בטווח 2° ממנו. התא שירה אותם היה צריך להשאיר גירעון מסה מתחת ללוע, והירחים צריכים לשאת חומר של מאדים בלי רכיב של גוף פוגע. הדרישה נכשלת אם הדגימות של Phobos שתחזיר MMX מראות מקור שאינו של מאדים או מקור מעורב, או אם הכבידה מתחת ללוע של Pavonis מראה עודף מסה. מאמר 10 הוא מבחן נפרד; תוצאתו אינה משנה את הפרמטרים של מקרה כדור הארץ-ירח.

גם ציר כדור הארץ עשוי היה להשתנות אחרי הניתוק, ודבר כזה היה גורם ל-SPA להיראות היום שלא בקו אחד עם הברנר; הצירים הושארו בכוונה לעבודה עתידית, ואינם דרישה של המאמר הזה.

עם חלק C, המאמר ניסח את כל שמונה-עשרה הדרישות: שבע תכונות קלאסיות, אזורי החשיפה, שבע הדרישות הנובעות מן האגס, ושלוש שנוספו אחריו. חלק D מרכז את מה שיפריך כל אחת, ואת מה שנשאר פתוח.

חלק D — עקביות בין המאמרים, הפרכה ומסקנות

הבעיה

התאמה על פני הירח אינה סוגרת פער פיזיקלי במנגנון הבנייה. ירח שנראה כפי שהמודל אומר שהוא צריך להיראות הוא תנאי הכרחי, אך לא מספיק: גם השלבים שבנו אותו — ההזנה מלמטה, עליית הקליפה, השחרור — חייבים לעבוד כפיזיקה. **הגישה:** להשתמש באותה מערכת תנאים בכל המאמרים ולהפוך את התלויות בין הטענות שלהם למפורשות, כך שהקורא יוכל לראות איזו תוצאה נשענת על איזו, ואיזה ממצא יחיד יפיל איזה חלק.

החלקים A עד C ניסחו את הדרישות אחת אחת: R1–R8 לירח שנבנה בעודו מחובר, R9–R15 שנוספו בעקבות האגס, ו-R16–R18 שנוספו בעקבות המאמרים שנסגרו אחריו. חלק D מתרחק צעד אחד אחורה ומתייחס אליהן כאל מערכת אחת. הוא עושה ארבעה דברים. הוא מונה מה כל מאמר בסדרה מעביר למאמר הזה, ומה כל אחד מהם עדיין משאיר פתוח (D.1§). הוא דן בסולם הזמן, שבו שעון איזוטופי מציב אילוץ קשה על כל בנייה ממושכת (D.2§). הוא מרכז את כל המבחנים במפת הפרכה אחת, כדי שהקורא יוכל לראות בטבלה אחת מה יפריך כל טענה וכמה יפול יחד איתה (D.3§). לאחר מכן הוא מציין מה חדש בעבודה (D.4§), ומסתיים במסקנות, כשאחרי כל אחת מהן בא פירושה (D.5§).

D.1 התנאים שמאמר 11 מקבל מן הסדרה

השאלה שהסעיף הזה עונה עליה היא: מה המאמר הזה מקבל מן המאמרים האחרים כנתון, ומה הוא עדיין צריך לדרוש? הסדרה מחלקת ביניהם את העבודה. מאמר 2 קובע את התנאים המסלוליים, מאמר 3 בונה את המנגנון, מאמרים 4–8 עוקבים אחרי הירח אחרי השחרור וקוראים את פני השטח שלו, ומאמר 10 עוקב אחרי אותו רעיון על מאדים. כל אחד מהם מעביר תוצאה למאמר הזה, וכל אחד משאיר תנאי שתוצאה לבדה אינה מכריעה.

את הטבלה קוראים שורה אחת שורה ומימין לשמאל. העמודה הראשונה מציינת את המאמר. השנייה נותנת את התוצאה שהמאמר מעביר לכאן — מה המאמר הזה רשאי להשתמש בו כקלט. השלישית נותנת את התנאי שעדיין נדרש: החלק של הטענה שהתוצאה עדיין אינה מוכיחה, ושמאמר 11 שומר לכן כדרישה עם מבחן משלה. השורות מסודרות לפי סדר המאמרים; הגוון מקבץ אותן לפי סוגן. שורות בגוון כחול כהה הן המאמרים שבונים את הגוף ומשחררים אותו (מאמרים 2–4); שורות בגוון אדום הן המאמרים שקוראים את פני השטח של הירח (מאמרים 5–8); שורות לבנות הן המבחן הנוסף על מאדים והמאמר הזה עצמו. קריאת הטבלה מלמעלה למטה עוקבת אפוא אחרי התרחיש עצמו: מן המנגנון, אל פני השטח שהשאיר, אל המבחנים שמחוצה לו.

מאמר	התוצאה שמועברת לכאן	התנאי שעדיין נדרש
2 — מנגנון LEF בעיקרון: קורוטציה	מצבי מסלול ותנע במונחים מפורשים של מסה וסיבוב	הישרדות ושחרור אינם נובעים משוויון המהירויות לבדו

3 — מנגנון LEF בפועל, חלק A	מצב לדוגמה עם עודף לחץ רדיאלי חיובי	האיזון הרדיאלי מתקיים החל מרדיוס מעבר של כ-1,000 ק"מ, שבו המעבר כבר מחזיק 0.46 מסות ירח וחייב לשאת עומס צידי מסדר גודל של 10^{22} ניוטון; החיבור הוא לכן הבסיס הרחב של הכיפה
3 — מנגנון LEF בפועל, חלק B	חצי הכדור: צפיפות 1,300 ק"ג/מ"ק, שטח פנים פי שלושה מחצי הכדור הרחוק, כלל התרגום	אזורי החשיפה והתעבות הקרום נובעים מכלל אחד; הצמיגות של הקליפה $\approx 10^{23}$ פסקל-שנייה) היא דרישה, לא מדידה
4 — המסלול: המסלול אחרי השחרור	שחרור בקו רוחב 22.5° , ב-17,287 ק"מ, למסלול מעגלי; התפתחות המסלול והכיוון	דורש את תנאי השחרור של מאמרים 3–2
5 — הימות	34 הימות כפתחים מעל כיפות הזנה; המישורים הכהים הם קרום שהותך, לא ימות; הסיווג של R8	R16 (§C.7)
6 — המכתשים	החומר החוזר ונחיתתו על הקליפה; 34 הימות כמקור; מכתשים על רצפות ימות הותכו	מהירות החומר החוזר אינה מוכחת שם; R16 (§C.7)
7 — הקטבים	ההתעגלות של הגוף המחובר; הצפיפות לעבר הקטבים עולה עם גודל המכתש	הדרישה של C.6§
8 — South Pole–Aitken	המרכז הדל במכתשים כסימן של מקור חום שמול הפתחים של הצד הקרוב, עם שתי יציאות (Imbrium -I Serenitatis); הכיפה מדרום לשתייה	R17 (§C.7)
10 — מאדים	מבחן נוסף, בפרמטרים של מאדים	שני פקקים שנורו מצינור אחד ממאדים מהיר ומורחב; טבעת משלימה את מסלוליהם
11 — המאמר הזה, הדרישות	התאמות תצפיתיות ומבחנים	הם אינם מחליפים את סגירת ההזנה, העלייה והשחרור

מה השורות אומרות. רדיוס הקורטציה של מאמר 2 הוא המרחק ממרכז כדור הארץ שבו גוף שמסתובב עם כדור הארץ כבר נע במהירות של מסלול חופשי: גוף המשלים סיבוב אחד יחד עם סיבוב כדור הארץ נע שם בדיוק במהירות של מסלול מעגלי חופשי. בסיבוב של 5.77 שעות שבזמן השחרור הוא נמצא ב-16,399 ק"מ על קו המשווה. מאמר 2 מגדיר את מצבי המסה, הסיבוב והתנע הזוויתי — כמות הסיבוב שמערכת מסתובבת או מקיפה נושאת, ששום תהליך פנימי אינו יכול ליצור או להשמיד — שבהם השוויון הזה מתקיים. התנאי של השורה הוא ששוויון מהירויות הוא רק נקודת מפגש: הוא אינו מראה לבדו שהגוף שרד את הגאות של כדור הארץ או שהשתחרר. לכן השחרור נשמר כאן כדרישה.

שתי השורות של מאמר 3 נושאות את המנגנון. בחלק A, עודף הלחץ הרדיאלי הוא הדחיפה כלפי חוץ של החומר העמוק שנותרת אחרי ששולם משקל העמוד שמעליו; עודף חיובי פירושו שההזנה יכולה לעלות. התנאי מראה מדוע החיבור אינו יכול להיות גבעול צר: האיזון מתקיים רק במקום שבו רדיוס המעבר הוא כ-1,000 ק"מ, ושם המעבר כבר מחזיק 0.46 מסות ירח וחייב לשאת עומס צידי מסדר גודל של 10^{22} ניוטון. עומס בגודל כזה נישא

על ידי כל הבסיס של הכיפה, ולכן הסדרה מדברת על בסיס רחב ולא על צוואר. בחלק B הגוף הוא חצי כדור בצפיפות ממוצעת של $1,300 \text{ ק"ג/מ"ק}$, ששטח פניו המעוגל גדול פי שלושה משטח חצי הכדור הרחוק שאליו הוא נסגר; כשפני השטח האלה נסגרים, הקליפה שעליהם מתעבה בערך פי שלושה, ואותו כלל שממפה את הכיפה על הכדור (כלל התרגום) נותן גם את אזורי החשיפה של R8 וגם את הקרום העבה של הצד הרחוק. צמיגות היא ההתנגדות של חומר לזרימה; קליפה של $10^{23} \gtrsim$ פסקל-שנייה זורמת לאט כל כך, שמכתש עליה שומר על העיגול שלו בזמן שהכיפה עולה ונסגרת. הערך הזה הוא מה שהקליפה חייבת שיהיה לה כדי שהתיעוד ישרוד; הוא נדרש, לא נמדד.

מאמר 4 מקבל את הירח בזמן השחרור — בקו רוחב 22.5° , שבו קו הקורטוציה נמצא $17,287 \text{ ק"מ}$ ממרכז כדור הארץ, במסלול מעגלי — ועוקב אחריו בהתרחקותו; כל החשבון שלו מתחיל מתנאי השחרור של מאמרים 2–3, ולכן הוא יורש את התנאי הפתוח שלהם. מאמרים 5 ו-6 יחד נותנים לפתחים של הצד הקרוב את תפקידם: 34 הימות הם פתחים מעל כיפות הזנה, החומר שיצר את המכתשים יצא דרכם ונחת על הקליפה, ומכתשים שנחתו על רצפת ים פעילה הותכו. מה שהם מעבירים הלאה כדרישה הוא R16, ומאמר 6 מציין שמהירות החומר החוזר אינה מוכחת בו. מאמר 7 מדד את ההתעגלות של הגוף המחובר במכתשים עצמם: הקליפה נשאה את המכתשים שלה שלמים, והצפיפות לעבר הקטבים עולה עם גודל המכתש, מ- 1.09 במכתשים של $20\text{--}30 \text{ ק"מ}$ ל- 1.53 במכתשים של $60\text{--}100 \text{ ק"מ}$ (R15, §C.6). מאמר 8 קורא את המרכז הדל במכתשים של South Pole–Aitken כסימן בצד הרחוק של החום שיצא דרך הפתחים של הצד הקרוב, כאשר Imbrium היא היציאה הראשית ו-Serenitatis המשנית, והכיפה נמצאת מדרום לשתייה; הקריאה הזאת הופכת ל-R17.

מאמר 10 עוקב אחרי הרעיון על כוכב לכת שני, בפרמטרים של מאדים: מאדים מהיר ומורחב ירה שני פקקים מן הקרום שלו עצמו מצינור אחד, וטבעת השלימה את מסלוליהם. השורה האחרונה היא המאמר הזה. ההתאמות והמבחנים שלו בודקים את התוצאה; הם אינם יכולים לבוא במקום הפיזיקה של ההזנה, העלייה והשחרור שהשורות הקודמות דורשות. מאמר 9 (הפסים) אינו מופיע כשורה: הממצאים שלו בצד של כדור הארץ — קצה האגס והפסים בצדו המוביל — נכנסים למאמר הזה ב-C.2§ וב-C.6§, והמבחנים שלו מנויים באותו מאמר ואינם ממוספרים כאן.

הערכים בשורות של מאמר 3 הם מקרי מבחן שהוגדרו שם, ולא מצב יחיד של המערכת לכל משך התרחיש: הצפיפות של $1,300 \text{ ק"ג/מ"ק}$, המעבר של $1,000 \text{ ק"מ}$ והעומס מסדר גודל של 10^{22} ניוטון מתארים רגע אחד שנבחר לשם בדיקת האיזון, והגוף משתנה במהלך העלייה. אין להעביר את הצמיגות של המשטח המפריד בבסיס הקליפה אל פני השטח המשמרים מכתשים. השתיים שייכות לשכבות שונות: המשטח המפריד בין הקליפה לבין הפנים הוא השכבה החלשה ביותר בגוף, והרכות שלו היא מה שמאפשר לקליפה לרכוב מעלה על הכיפה, ואילו פני השטח ששומרים על המכתשים חייבים להיות קשיחים. הצמיגות של הקליפה עצמה, מסדר גודל של 10^{23} פסקל-שנייה או יותר לאורך העלייה, היא דרישה, לא נתון חומרי שנמדד.

2.D הכרונולוגיה נשאר אילון מרכזי

השאלה שהסעיף הזה עונה עליה היא אם אפשר ליישב את סולם הזמן של התרחיש — בנייה הנמשכת מאות מיליוני שנים — עם השעונים האיזוטופיים שמתארכים את הפרדת המתכת מן הסיליקט בכדור הארץ ובירח הקדומים.

מערכת Hf–W מגבילה תהליכים של הפרדת מתכת מסיליקט. במילים פשוטות, זה שעון שמפסיק לתקתק אחרי כמה עשרות מיליוני שנים. איזוטופ רדיואקטיבי של הפניום (Hf) מתפרק לאיזוטופ של טונגסטן (W). ההפניות נשאר עם הסיליקט כשמתכת נפרדת ממנו, ואילו הטונגסטן מעדיף את המתכת ויורד איתה אל ליבה. אם מתכת נפרדת בזמן שההפניות הרדיואקטיבי עדיין קיים, הסיליקט שנותר שומר על ההפניות שלו, וכשההפניות הזה מתפרק הסיליקט צובר עודף של טונגסטן מאיזוטופ הבת; גודל העודף הזה מתעד כמה מוקדם התרחשה ההפרדה. ברגע שאיזוטופ האם אוזל, אי אפשר ליצור עודף חדש, והשעון נעצר. הפירוש של המערכת תלוי

בהיסטוריית ההצטברות ובמידת שיווי המשקל הכימי [S11]: כמה מן המתכת שנכנסה החליפה טונגסטן עם הסיליקט שדרכו עברה לפני שצללה. אין מכאן שדי לומר "שיווי המשקל חלקי" כדי להתיר כל משך התמיינות. שיווי משקל חלקי מרחיב את טווח הקריאות, אך עדיין יש לחשב אותו עבור היסטוריה מוצהרת; הוא אינו פרמטר חופשי שאפשר לכוון אותו כך שיתאים לכל סולם זמן.

להבהרת סולם הזמן בלבד, בהנחת זמן מחצית חיים של 8.9 מיליון שנה:

$$\frac{N(t)}{N_0} = 2^{-t/(8.9 \text{ Myr})}.$$

משוואה (10) היא חוק הדעיכה הרדיואקטיבית, כתוב באמצעות זמן מחצית החיים. N_0 היא כמות איזוטופ (10) האם הרדיואקטיבי בהתחלה, $N(t)$ הכמות שנותרה אחרי זמן t , ו-8.9 מיליון שנה הוא זמן מחצית החיים — הזמן שבו מתפרקת מחצית ממה שקיים. המעריך $t/(8.9 \text{ Myr})$ סופר כמה זמני מחצית חיים חלפו, וכל אחד מהם מחצה את מה שנותר. אחרי מספר קטן של זמני מחצית חיים, כמה עשרות מיליוני שנים, כמעט דבר לא נותר מאיזוטופ האם. זה המובן שבו השעון נעצר.

אחרי 600 מיליון שנה נותר חלק של 5.1×10^{-21} מאיזוטופ האם הרדיואקטיבי. 600 מיליון שנה הם עשרות רבות של זמני מחצית חיים, וחיצוי כה רב של פעמים אינו משאיר, למעשה, דבר: השעון עומד במשך רוב החלון. החלון הזה הוא קו הזמן המשוער 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 לפחיסות, וכ-100 מיליון שנה נוספות עד השחרור. מערכת שכבתה עדיין יכולה לשמר הבדלים שנוצרו קודם לכן; אי אפשר להתייחס אליה כאל שעון שמתחיל מחדש בסוף החלון. החתימות של הטונגסטן שהירח נושא נקבעו לכן בזמן שאיזוטופ האם עוד היה קיים, בתחילת החלון, והתרחיש חייב לשאת אותן לאורך שאר החלון בלי לאפס אותן. היסטוריית מאגרים חייבת לחשב את החתימות, את חלק המתכת שהועבר ואת התנע הזוויתי בתוך כרונולוגיה עקבית אחת: חשבון אחד של המקום שבו היה כל מאגר, מתי נפרדה המתכת שלו, וכמה ממנו הגיע לירח, כאשר אותם זמנים משמשים לשלושתם. **מצב:** טרם חושב. זו הדרישה שהכרונולוגיה מציבה למודל, והיא מנויה עם שאר החישובים הפתוחים ואינה מונחת כמתקיימת.

D.3 מפת ההפרכה

השאלה שהסעיף הזה עונה עליה היא: מה יראה שהמודל שגוי, וכמה ממנו ייפול? כל הדרישות של החלקים A עד C מרוכזות כאן בטבלה אחת. העמודה הראשונה מציינת את הטענה, ובסוגריים את הדרישה או הסעיף שבו היא מנוסחת. השנייה נותנת את הדרישה המפורשת — מה המודל חייב לספק. השלישית נותנת את המבחן ואת התנאי שבו הוא נכשל. הרביעית נותנת את היקף המסקנה: עד היכן מגיע כישלון. עמודת ההיקף חשובה כמו עמודת הכישלון. רוב הכישלונות מסירים ענף אחד של ההסבר ומשאירים את השאר עומד; שורה אחת — אזורי החשיפה, המודגשת בגוון בטבלה — היא התצפית שתסיים את המודל.

הטענה הנבדקת	הדרישה המפורשת	מבחן ותנאי כישלון	היקף המסקנה
מקור ארצי (R1)	התאמה בכמה מערכות אחרי תהליכי הפרדה מותרים	אין פתרון בתוך תחומי המקור ושגיאות המדידה	פוגע במקור הבלעדי בגרסה הנבדקת
אספקת מתכת (R2)	טווח של f_{core} העקבי עם נתוני הפנים	ההובלה וההתמיינות חוזות חלק מחוץ לטווח המותר	פוגע במנגנון ההעברה של מאמר 3
חומרים נדיפים והזנה (R6)	תנאי הלחץ, הצפיפות, הזרימה והאנרגיה מתקיימים יחד	אין חפיפה בין מצבי חומר נתמכים לבין דרישות ההובלה	כישלון של מסלול הבנייה הנתון

עלייה ושימור (C.1§)	הקליפה עולה עם הכיפה ומשמרת את התיעוד המיוחס לה	אין תחום ראולוגי משותף לשתי הדרישות	כישלון של גרסת הכיפה במאמר 3
קרום ומסה (R3)	אותה מסה נותנת עובי והרכב אפשריים	עודף או חוסר של חומר שאינו נפתר בתוך השטפים המותרים	כישלון של המאזן בין החיצוני לפנימי
סדר הסגירה (R5)	סדר שימור בין יחידות מזוהות	תיארוך מקביל מחייב את הסדר ההפוך	כישלון של התחזית הכרונולוגית הספציפית
קרום ומרכז המסה (R7)	צפיפות ועובי נותנים וקטור היסט תואם	אין פתרון משותף בתוך מסגרת שגיאה נתמכת	כישלון של ההסבר המבני הספציפי
אזורי החשיפה (R8)	סידור של העובי, סוג האגנים והמכתשים הוותיקים ביותר לפי המרחק הזוויתי ממרכז הצד הקרוב	אין סידור כזה, או סידור סביב ציר אחר	כישלון של הגאומטריה של הכיפה במאמר 1 — התצפית שמסיימת את המודל
טבעות ופתחים (C.3§)	הבדל מדיד בין קבוצות שנקבעו מראש	ההבדל נעדר, או מוסבר במלואו על ידי הבקורות הקבועות	כישלון של הענף המורפולוגי
פתחים ומכתשים (R16)	34 הימות הם הפתחים והמקור של החומר החוזר	רצפות ימות עשירות במכתשים חדים כמו מישורים בני אותו גיל	כישלון של מקור החומר החוזר
הסימן בצד הרוחק (R17)	מרכזי SPA מסודרים מדרום לשתי היציאות	אין סידור סביב הנקודות שמול הפתחים	כישלון של קריאת SPA כסימן של הברנר
מאדים (R18)	שני הירחים נורו מצינור משווני אחד, Pavnos	Phobos שאינו של מאדים; עודף מסה מתחת ללוע	כישלון של המבחן על מאדים, בלי לשנות את הפרמטרים של כדור הארץ

השורות במילים.

- **מקור ארצי.** האיזוטופים של הירח חייבים להתאים לחומר ארצי בכמה מערכות בבת אחת — חמצן, טיטניום, כרום, טונגסטן והיסודות הנדיפים — אחרי ההפרדה וההתאדות שהתרחיש מתיר. המבחן נכשל אם שום תערובת של תחומי המקור של כדור הארץ אינה מתאימה לכולן בתוך שגיאות המדידה. הנזק הוא לטענה שכדור הארץ הוא המקור היחיד, בגרסה הנבדקת.
- **אספקת מתכת.** f_{core} הוא החלק של מסת הירח שבליבה, הניתן במשוואה (1); הליבה הסייסמית עקבית עם כ-1.4%. אם ההובלה וההפרדה של המתכת בהזנה חוזרת חלק מחוץ לטווח שנתוני הפנים מתירים, נכשל מנגנון ההעברה של מאמר 3, ולא המודל כולו.
- **חומרים נדיפים והזנה.** המנגנון משתמש בחומרים נדיפים כדי להוריד את צפיפות ההזנה, לשנות את הראולוגיה שלה ולספק את הלחץ שלה (A.6§); המים שנמדדו בתכלילי התכה ירחיים מראים שחומרים נדיפים היו בתוך הירח, אך עדיין לא שהם היו שם בכמות ובפאזה שההובלה צריכה (B.6§). הלחץ, הצפיפות, הזרימה והאנרגיה חייבים כולם להתקיים באותו מצב חומר. אם שום מצב שהנתונים תומכים בו אינו עונה גם על דרישות ההובלה, מסלול הבנייה הזה נכשל.
- **עלייה ושימור.** אותה קליפה חייבת לרכוב מעלה עם הכיפה ולשמור על המכתשים שלה עגולים. חייבת להתקיים ראולוגיה — האופן שבו חומר מתעוות וזורם תחת עומס — שמאפשרת את שני הדברים: משטח

מפריד חלש מתחת, קליפה קשיחה של $10^{23} \gtrsim$ פסקל-שנייה מעליו. אם אין תחום כזה, נכשלת גרסת הכיפה של מאמר 3.

- **קרום ומסה.** הקליפה שעל הכיפה (2.85×10^{21} ק"ג) חייבת לספק את הקרום של הצד הרחוק (2.6×10^{21} ק"ג, B.3§), כאשר הקרום של הצד הקרוב הוא איבר נפרד. עודף או חוסר ששום שטף מותר של חומר אינו פותר שוברים את המאזן בין מה שבא מחוץ לגוף לבין מה שנוצר בתוכו.
 - **סדר הסגירה.** היחידות נסגרו ונשתמרו בסדר קבוע; המודל חוזה שקרום הרמות של הצד הרחוק ותיק יותר מקרום רמות בר-השוואה בצד הקרוב. אם תיארוך מקביל של יחידות ברות-השוואה מחייב את הסדר ההפוך, התחזית הכרונולוגית הזאת נכשלת.
 - **קרום ומרכז המסה.** מרכז המסה של הירח נמצא כ-2 ק"מ ממרכז הצורה שלו, לעבר כדור הארץ. הצפיפות והעובי של הקרום חייבים לתת היסט שמתאים לו גם בגודל וגם בכיוון. אם אין פתרון משותף בתוך מסגרת שגיאה נתמכת, ההסבר המבני הזה נכשל.
 - **אזורי החשיפה.** הכיפה נסגרה ברצף קבוע, ולכן עובי הקרום, סוג האגנים והמכתשים הוותיקים ביותר חייבים להיות מסודרים לפי המרחק הזוויתי ממרכז הצד הקרוב — דיסקת המגע, חגורת הקצה, הצד הרחוק — ולא לפי שום ציר אחר. זו התחזית היחידה החזקה ביותר של המנגנון. אם הסידור נעדר, או מתקיים סביב ציר אחר, נכשלת הגאומטריה של הכיפה, ואיתה המודל. חלק B מדווח היכן המבחן עומד: T5 ו-T2 עברו; T1 לא עבר — הצד הרחוק עולה על דיסקת המגע ב-9.65, 10.0, 10.3 ו-10.6 ק"מ בארבעת מודלי GRAIL, כך שבמודל 1 ההפרש נמצא 0.35 ק"מ מתחת לקו ההפרכה של 10 ק"מ ומודלים 2–4 נמצאים בין הקווים, בעוד הסידור מתקיים בכל הארבעה (B.8, §B.9§; גרסה קודמת דיווחה על T1 כפתוח).
 - **טבעות ופתחים.** הפתחים מחולקים לקבוצות — כתר, צלע ומתחת לבסיס — שנקבעו לפני שהטבעות נבדקות. הקבוצות חייבות להיבדל באופן מדיד. אם אינן נבדלות, או שההבדל מוסבר במלואו על ידי הבקורות שנקבעו מראש, נכשל הענף המורפולוגי; כפי ש-C.3§ קובע, הדבר אינו מבטל את משוואת הקורוטציה.
 - **פתחים ומכתשים (R16).** אם הימות היו הפתחים והמקור של החומר החוזר, רצפות הימות חייבות להיות דלות במכתשים חדים, משום שמכתשים שנחתו על רצפה פעילה הותכו. מאמר 6 מדד 0.8 מכתשים חדים של 20 ק"מ ומעלה למיליון קמ"ר על הרצפות, לעומת 18.3 על המישורים ו-207 ברמות (B.9§). רצפות עשירות במכתשים חדים כמו מישורים בני אותו גיל יפריכו את מקור החומר החוזר.
 - **הסימן בצד הרחוק (R17).** המרכזים של South Pole–Aitken חייבים להיות מסודרים מדרום לנקודות שמול שתי היציאות, Serenitatis–Imbrium. מאמר 8 ממפה אותם כך (איור C.1). היעדר סידור סביב הנקודות שמול הפתחים יפריך את קריאת SPA כסימן של הברנר.
 - **מאדים (R18).** שני הירחים חייבים להיות חומר של מאדים שנורה מצינור אחד על קו המשווה, ב-Pavonis Mons. Phobos מחומר שאינו של מאדים או מחומר מעורב, או עודף מסה מתחת ללוע של Pavonis, מכשילים את המבחן על מאדים; הדבר אינו משנה את הפרמטרים שנמצאו עבור כדור הארץ.
- "אין פתרון" מחייב תחום פרמטרים מוגדר ומנומק, ולא בדיקה של נקודה אחת: טענה ששום דבר אינו עובד חייבת להראות ששום דבר אינו עובד בכל הטווח שהנתונים מתירים. מן הצד השני, הצלחה בבחירת פרמטרים אחת אינה מבססת מסלול היווצרות שלם. הצגת המדגם, השגיאות, הטווחים ותהליך החישוב מאפשרת לקורא להעריך את הטענה לפי דרישת הביקורת: תחזית → מפורטת → חסינה → ניתנת להערכה → ניתנת להפרכה. בקריאה לפי הסדר, השרשרת דורשת שכל טענה תהיה תחזית, מנוסחת בפירוט מספיק כדי שאפשר יהיה לחשב אותה, חסינה לשינויים סבירים בקלטים שלה, ניתנת להערכה בידי קורא חיצוני על סמך הנתונים שניתנו, ומסוגלת להיכשל. המפה שלמעלה בנויה כך שכל שורה בה עומדת בשלב האחרון.

D.4 החידוש בעבודה

השאלה כאן היא מה העבודה מוסיפה, ומה היא אינה טוענת. כבידה, שימור מסה, התמיינות, התקררות הקרום וגאות הם פיזיקה קיימת. גם הרעיון שכדור ארץ חם יכול ליצור אסימטריה בירח אינו חדש [S5]: Roy ועמיתיו הציעו שהזוהר של כדור ארץ צעיר וחם חימם את הצד הקרוב, וכך מסביר את הרמות העבות יותר בצד הרחוק. התרומה של LEF שנבדקת כאן היא הקשר בין הזנה עמוקה בזמן המגע לבין עליית הקליפה החיצונית כפני השטח של אותו גוף, והדרישה ששניהם יחד ייתנו מסה, מבנה ותיעוד תואמים. במילים אחרות, היסוד החדש אינו תהליך בודד כלשהו אלא הצירוף שלהם בגוף אחד: הפנים התמלא מלמטה, בעוד שהעור שלו היה הקליפה של כדור הארץ עצמו, שהורמה על הכיפה.

התרומה של המאמר הזה היא ניסוח המבחנים באותה מסגרת, ובמיוחד הקישור בין התחזית לעובי הקרום לבין היסט מרכז המסה, ובין מלאי הקליפה לבין מסת הקרום. המשוואות עצמן נגזרות מפיזיקה סטנדרטית; היישום שלהן לתרחיש אינו טענה לגילוי חוק חדש. המאמר אינו טוען לבלעדיות היסטורית על כל רכיב לפני סקירת ספרות מקיפה של אותו רכיב. נספח B מפרט, רכיב אחר רכיב, מה הוא פיזיקה סטנדרטית, מה הוא תצפית קודמת או ידע קודם, ומה הוא ההשערה של המודל עצמו.

D.5 מסקנות

אחרי כל מסקנה בא מה שהיא אומרת על המודל.

1. מקור ארצי, מעט מתכת, חומרים נדיפים ואסימטריה הם יעדים תצפיתיים שהתרחיש חייב להסביר יחד. קיומם אינו מאשר לבדו את מסלול ההובלה. *מה זה אומר:* ארבע התכונות הן מה שכל הסבר חייב לייצר; המסלול של LEF זוכה בהן רק כשההזנה, העברת המתכת והקליפה מחושבות כך שייתנו את ארבעתן בבת אחת.
2. הסינכרוניות של היום היא מבחן עקביות חלש; שימור כיוון החיבור מחייב התפתחות דינמית אחרי השחרור. *מה זה אומר:* העובדה שהירח מפנה היום פנים אחת אל כדור הארץ מתיישבת עם גוף שיצא כשפני המגע שלו פונים אל גוף האם, אך גם הגאות לבדה הייתה נותנת זאת; המודל חייב להראות שהפנים שאיתן יצא הן הפנים שהוא שומר.
3. גילי הקרום, הפגיעות והבזלת מודדים תהליכים שונים. סדר הסגירה ומשך הבנייה אינם מוכרעים על ידי נתוני הבזלת. *מה זה אומר:* הגיל של התגבשות הקרום, הגיל שהספרות מייחסת לאירוע שיצר אגן, והגיל של הבזלת שמילאה אגן הם שלושה שעונים שונים; את הסדר שבו הגוף נסגר יש לקרוא מיחידות ברות-השוואה בשני הצדדים, ולא מן הבזלות.
4. הקליפה של הכיפה מספקת את הקרום של הצד הרחוק — 2.85×10^{21} לעומת 2.6×10^{21} ק"ג (2.7×10^{21} בגרסה קודמת) — והקרום של הצד הקרוב הוא הסיאל של הבסיס, שנקלף יחד עם הגוף; השניים הם איברים נפרדים במאזן. *מה זה אומר:* שתי המסות מתאימות זו לזו בכ-10% (7% בגרסה הקודמת) בלי שום פרמטר שכוון ביניהן, ולצד הקרוב יש מקור משלו: הסיאל, השכבה החיצונית הקלה, העשירה בצורן ובאלומיניום, של כדור הארץ הקדום, שעליה ישב הגוף, ושנקלפה מן השכבה הצפופה יותר שמתחתיה ויצאה עם הירח.
5. התרומה של קרום עבה וקל בצד הרחוק למרכז המסה מצביעה לעבר הצד הדק בתנאים שנגזרו. הגודל והכיוון הכוללים מחייבים מודל צפיפות משותף. *מה זה אומר:* החלפת מעטפת צפופה בקרום קל בצד הרחוק מזיזה את מרכז המסה לעבר הצד הקרוב, כפי שנצפה; גודל ההיסט, 1.24–3.11 ק"מ בדוגמה של B.78, הופך למבחן רק כשמודל צפיפות אחד קובע את העובי ואת ההיסט יחד.
6. תיעוד המכתשים הנישא, החריגה של אזור החיבור וסיווג הפתחים עומדים כתחזיות שייבחנו עם בקורות על פגיעה, קבורה ועיוות. *מה זה אומר:* המכתשים שהקליפה נשאה שלמים, אזור המגע — שמרכזו ב- 24.1° צפון

335.2° מזרח, כאשר Imbrium היא היציאה הראשית ו-Serenitatis המשנית — וקבוצות הפתחים נבחנו כל אחד מול הקריאות שאחרים נותנים להם: מכתשים שנוצרו במקומם בפגיעה, מכתשים שנקברו מתחת לבזלת, ועיוות מאוחר של הקרום.

7. המבחנים במאמר הזה מעריכים את הדרישות ממאמר 3 יחד עם הכרונולוגיה. כל מבחן מזהה מה יענה על הדרישה שלו ומה ישלול את הגרסה הנבדקת. *מה זה אומר*: המודל מוצב במקום שבו הוא יכול להיכשל, שורה אחר שורה, והקורא יכול לראות בכל נקודה מה עבר (T5 ו-T2 של R8, R15, R16, R17), מה פתוח, ואיזו תצפית יחידה תסיים אותו.

נספח A — שחזור החישוב של מרכז המסה

הנספח הזה נותן את האינטגרציה הקצרה שמאחורי משוואות (8) ו-(9) של B.7§, כדי שקורא יוכל לבדוק ביד כיצד קרום דק בצד אחד ועבה בצד השני מזיז את מרכז המסה של הירח. השאלה שהוא עונה עליה פשוטה: אם הקרום הקל דק יותר לכיוון החיבור, כמה זז מרכז המסה לעבר הצד הזה, ובאיזה כיוון?

לגוף כדורי שבו גבול הקרום-מעטפת הוא $r = b + A \cos \psi$, נגדיר $u = \cos \psi$. כאן ψ הוא המרחק הזוויתי מציר החיבור, b הוא הרדיוס הממוצע של גבול הקרום-מעטפת ($b = R_L - h_0$), רדיוס הירח פחות עובי הקרום הממוצע), ו- A הוא המשרעת שבה הגבול עולה לכיוון החיבור ושוקע הרחק ממנו. משום שפני השטח הם כדור, גבול שעולה ב- A לכיוון החיבור פירושו קרום דק יותר ב- A שם, וזהו הקרום של משוואה (3), $h(\psi) = h_0 - A \cos \psi$. המשתנה u נע מ-1+ על ציר החיבור ועד -1- בנקודה הנגדית.

הרכיב הסימטרי כדורית אינו תורם מומנט מסה. מומנט מסה הוא הסכום של כל פיסת מסה כפול המרחק שלה לאורך הציר שנבחר; חלוקתו במסה הכוללת נותנת את מיקום מרכז המסה. כל מה שזהה בכל הכיוונים — מעטפת אחידה, ליבה מרכזית, קרום בעובי קבוע — תורם בצד אחד כמו בצד השני, ומתקזז. רק החלק ששונה בין שני הצדדים מזיז את מרכז המסה, וכאן החלק הזה הוא המעטפת הצפופה יותר שמגיעה גבוה יותר בצד שבו הקרום דק. תוספת הצפיפות $\Delta\rho$ בתוך הגבול (צפיפות המעטפת פחות צפיפות הקרום, $\Delta\rho = \rho_m - \rho_c$) נותנת:

$$M_L \delta_x = \frac{\pi \Delta\rho}{2} \int_{-1}^1 u (b + Au)^4 du.$$

במילים: מומנט המסה $M_L \delta_x$ הוא תוספת הצפיפות $\Delta\rho$ מסוכמת על פני האזור שבתוך הגבול המורם, כשכל (11) אלמנט משוקלל לפי המרחק שלו לאורך הציר. הגורם u הוא המשקל הזה (הקוסינוס של הזווית מן הציר), והביטוי $(b + Au)^4$ בא מן האינטגרציה של $r^3 dr$ עד הגבול בכל כיוון; האינטגרציה על הזווית סביב הציר נותנת את הגורם $\pi/2$.

האיברים האי-זוגיים מתאפסים באינטגרציה. כשפותחים את $(b + Au)^4$ ומכפילים ב- u , האיברים עם חזקה אי-זוגית של u גדולים בצד הרחוק כמו בצד הקרוב, בסימן הפוך, והאינטגרל שלהם מ-1- עד 1+ הוא אפס. האיברים שנותרים נותנים את משוואה (9): האיבר $4b^3 Au^2$ נותן $\frac{2}{3} 4b^3 A$, והאיבר $4bA^3 u^4$ נותן $\frac{2}{5} 4bA^3$. ולאחר הכפלה ב- $\pi \Delta\rho/2$ הם $4\pi \Delta\rho \left(\frac{b^3 A}{3} + \frac{bA^3}{5} \right)$. עבור $A, h_0 \ll R_L$ מתקבלת משוואה (8): כשהקרום דק ביחס לרדיוס, b קרוב ל- R_L והאיבר השני זניח, ולכן $\delta_x \simeq \left(\Delta\rho/\bar{\rho}_L \right) A$. הקריאה הפיזיקלית היא שמרכז המסה זז לעבר הצד הדק במשרעת A , מוכפלת ביחס בין ניגוד הצפיפות לבין הצפיפות הממוצעת של הירח.

הקלט המספרי הוא $M_L = 7.35 \times 10^{22}$ ק"ג, $R_L = 1.7374 \times 10^6$ מ', $h_0 = 45\,000$ מ', $A = 15\,000$ מ'. שני הראשונים הם המסה והרדיוס הממוצע של הירח. ערכי הקרום הם אלה של איור 1: קרום של 30 ק"מ במרכז הצד הקרוב ושל 60 ק"מ בצד הרחוק נותן ממוצע של 45 ק"מ ומשרעת של 15 ק"מ. אלה נתוני דוגמה בלבד. אין בהם שימוש להתאמה חדשה של מפת GRAIL. מטרתם להראות שקרום בצורה הזאת נותן היסט בסדר הגודל הנצפה (הטבלה של B.7§: כ-1.2 עד 3.1 ק"מ עבור ניגודי צפיפות של 300 עד 750 ק"ג/מ"ק), ולא לקבוע את מבנה הקרום האמיתי של הירח.

בדיקת הכיוון ב-B.7§ משתמשת במרחק הזוויתי בין נקודת הייחוס $(0, 0)$ לבין מרכז המגע. מרכז המגע נמצא ב- 24.1° צפון וב- 335.2° מזרח, כלומר 24.8° מערבית לקו האורך האפס. לנקודה בקו רוחב φ ובהפרש קו אורך λ מן הנקודה $(0, 0)$, המרחק הזוויתי γ על פני כדור מקיים $\cos \gamma = \cos \varphi \cos \lambda$.

$$\cos \gamma = \cos (24.1^\circ) \cos (24.8^\circ), \quad \gamma = 34.0^\circ.$$

לכך יש חשיבות משום שציר ההתעבות של המודל עובר דרך מרכז המגע, שנמצא במרחק 34.0° מן הנקודה שפונה אל כדור הארץ במפת הייחוס. היסט שמחושב סביב הציר הזה אינו חייב אפוא להצביע בדיוק לאורך קו כדור הארץ הממוצע, ו-B.7§ דורש לחשב את הווקטור המלא. אין זו מדידה של האוריינטציה של הירח בזמן היווצרותו; זוהי רק הזווית בין שתי נקודות על המפה של היום.

נספח B — מפת המחקר הקודם והחידוש

הנספח הזה מפריד בין מה שהמאמר לוקח מאחרים לבין מה שהוא מוסיף. למודל חדש קל לייחס רעיונות שאינם שלו, או להטיל עליו טענות שאינן טוען; הטבלה שלהלן קובעת, לכל רכיב, מאין הוא בא. קוראים אותה לפי שורות: העמודה הראשונה נותנת את שם הרכיב, השנייה את הסיווג שלו, והשלישית את מה שמותר ואסור לייחס לעבודה הזאת. הסיווגים נעים מן החומר המבוסס אל ההצעות של המודל עצמו: פיזיקה מקובלת (תוצאות של ספרי לימוד שמישמות כאן), תצפית קודמת (מדידות שערכו אחרים), רעיון קודם (רעיונות שהוצעו לראשונה על ידי אחרים, בשמם), השערת המודל (מה ש-LEF מציג), העבודה הזאת (חישוב שנעשה במאמר הזה) ותחזית פתוחה (מה שהמודל מצפה לו ועדיין לא נבדק).

רכיב	סיווג	מה אפשר לייחס לעבודה
חישוב מרכז המסה ושימור המסה	פיזיקה מקובלת	גזירה מפורשת ויישום לתרחיש
חמצן, ליבה, קרום, בזלת ומים	תצפית קודמת	מדידות של המחקרים המצוטטים, לא נתונים חדשים של המחבר
חימום לא אחיד מכדור ארץ חם	רעיון קודם — Roy ועמיתיו	אין לייחס את הרעיון עצמו ל-LEF
Procellarum כמערכת מאגנטית וטקטונית	רעיון קודם — Andrews-Hanna ועמיתיו	זיהוי כחיבור הוא פרשנות נוספת שעדיין לא נבדקה
הזנה פנימית בו-זמנית ועליית הקליפה	השערת המודל	השילוב שהסדרה מבקשת לבדוק
עובי-מסה-היסט באותו מודל	העבודה הזאת — מבחן עקביות	מבחן אנליטי על הנחות מוצהרות, לא תגלית כבידתית חדשה
תיעוד נישא וטבעות כסימני עומס	תחזית פתוחה	דורש זיהוי של אוכלוסיות ומודל מכני

הרכיבים של המאמר: מאין בא כל רכיב, וכיצד הוא מסווג, ומה מותר לייחס לעבודה הזאת לגביו.

הטבלה מראה היכן מונח משקל המאמר: התצפיות והפיזיקה שאולות ומיוחסות למקורן, ומה שהסדרה מוסיפה הוא השילוב — הזנה פנימית וקליפה חיצונית עולה הפועלות יחד — והמבחנים שיכולים להכריע בו. שני רעיונות קרובים ל-LEF, החימום הלא אחיד של הירח הצעיר על ידי כדור ארץ חם [S5] ו-Procellarum כמערכת מאגנטית גדולה [S4], שייכים למחבריהם; LEF משתמש בהם וקורא את Procellarum כחיבור, קריאה שעוד צריך לבדוק.

עבודה נוספת — פתחים למחקר

הפריטים שלהלן הם הנקודות הפתוחות של המאמר, מרוכזות במקום אחד. כל אחד מהם מציין את הדרישה שהוא משרת ואת החישוב או המדידה שיכריעו בו, כך שקורא שרוצה לבדוק את המודל יודע מאיפה להתחיל.

1. **הסטטיסטיקה של החגורות (R8).** החישוב של B.8§ נעשה בספטמבר 2026 על ארבעת מודלי עובי הקרום של GRAIL ועל הקטלוג של [S13] Robbins (T5 ו-T2 עברו; T1 לא עבר, כשמודל 1 נמצא 0.35 ק"מ מתחת לקו ההפרכה שלו ומודלים 2–4 בין הקווים; התוצאות ב-B.8§, עם החישוב החוזר מ-15 באוקטובר 2026 על הגאומטריה הנוכחית). מה שנותר: T2 על אוכלוסייה שנבחרה לפי גיל; T3 ו-T1 על מודלים 2–4 על הגאומטריה הנוכחית; ואותן חגורות על רשתות Bouguer ועל רשתות הצפיפות הרחבת של GRGM1200B. הספירה לפי גיל חשובה משום שהתחזית של המודל נוגעת לתיעוד העתיק שנישא על הקליפה; קטלוג של כל

הגילים מערבב אותו עם נחיתות מאוחרות יותר. רשת Bouguer היא מפת הכבידה לאחר שהוסרה ממנה המשיכה של הטופוגרפיה הנראית, כך שמה שנותר מראה הבדלי צפיפות מתחת לפני השטח; GRGM1200B הוא מודל כבידה של GRAIL ברזולוציה גבוהה.

2. **מאזן איזוטופי רב-מערכתי (R1).** ההרכב של ירח שנבנה מן הקליפה של כדור הארץ הקדום ומחומר עולה מן העומק, שעבר ניתוק והתאדות, בהשוואה לנתוני הירח בחמצן, בטיטניום, בכרום, בטונגסטן ובחומרים הנדיפים יחד. כל אחד מן היסודות האלה רושם תהליך אחר, ולכן תערובת אחת שמתאימה לכולם בבת אחת היא מבחן חזק בהרבה מהתאמה בחמצן בלבד.

3. **תקציב המתכת (R2).** הסחיפה של ברזל יורד בתוך התכה מוקצפת עולה: גודל הטיפות, השקיעה, והחלק שמגיע לליבה ירחית של 1.4%. חישוב דינמי-נוזלי עם קצב ההזנה של מאמר 3. השאלה היא כמה מן הברזל, שנוטה לשקוע חזרה אל כדור הארץ, נישא למעלה על ידי ההתכה העולה; הליבה הירחית הקטנה קובעת את היעד שהחלק הזה צריך להגיע אליו.

4. **הפתרון המשותף של קרום והיסט (R7).** עובי, צפיפות, טופוגרפיה ווקטור מרכז המסה במודל אחד, על הגאומטריה של אזורי החשיפה ולא על קליפה סימטרית. זו הרחבה של נספח A: הדוגמה שם מראה שסדר הגודל של ההיסט אפשרי; הפתרון המשותף יראה אם מודל צפיפות נתמך אחד נותן גם את גודלו וגם את כיוונו.

5. **שני קרומים, שני גילים (R5).** גילי התגבשות ברי השוואה של קרום הרמות בצד הרחוק ושל קרום הרמות בצד הקרוב, שנדגמו מחוץ לאגנים: המודל צופה שהצד הרחוק מבוגר יותר. החומר של Chang'e-6 הוא ההזדמנות הראשונה. גיל ההתגבשות הוא הזמן שבו החומר התמצק; הדגימה מחוץ לאגנים נמנעת מחומר שהותך שוב מאוחר יותר.

6. **הפתחים.** סיווג של הימות לפתחי פליטה (שפלטו חומר כשהיו חשופים) ולצינורות (שרק העבירו חומר כשהיו מכוסים), שנבדק מול שדות של מכתשים משניים, מול עובי הקרום מתחת לכל אגן ומול ההרכב של המילוי המוקדם ביותר. במודל, ים הוא פתח מעל כיפת הזנה; הסיווג שואל אילו פתחים שחררו חומר החוצה ואילו רק העבירו התכה כלפי מעלה תחת כיסוי, וכל סוג אמור להשאיר סימן שונה בשלוש המדידות שנמנו.

7. **האוקיינוס השקט.** שחזור מבני של הליתוספירה של כדור הארץ מתחת לאוקיינוס השקט, שאינו תלוי במפת הירח, להשוואה עם הקריאה של אזור המקור ב-C.28; ומיקום בסיס האגס, ליד Kiritimati, מול קווי המתאר של ה-LLVP של האוקיינוס השקט במודלים שפורסמו של המעטפת התחתונה ביותר. LLVP — אזור איטי גדול במעטפת התחתונה — הוא אחד משני אזורים בגודל של יבשת בבסיס המעטפת של כדור הארץ, מתחת לאוקיינוס השקט ומתחת לאפריקה, שבהם גלים סייסמיים נעים לאט יותר מאשר במעטפת שסביבם. השחזור חייב להיות בלתי תלוי במפת הירח, כדי שההשוואה תהיה מבחן ולא חזרה על אותה קריאה.

זמינות הקוד

כל התוצאות המספריות של המאמר משוחזרות על ידי התסריטים של חבילת השחזור של LEF (Python 3, numpy, scipy), שמדפיסה את הערכים של כל סעיף מתוך הקלטים המוצגים בטקסט. החבילה מלווה את הסדרה כחומר משלים ומופקדת ב-doi:10.5281/zenodo.22743615 (Zenodo); ה-DOI מוביל תמיד לגרסה העדכנית).

מקורות

המקורות החיצוניים מסומנים באות S כדי להבדיל אותם מן הדרישות R. המקורות תומכים בנתונים או בפיזיקה שמיוחסים להם; הם אינם מאמתים את מודל LEF. המקורות S11 ו-S2, S3, S7, S10 נשמרו מכתב היד המקורי; קריאת הטקסטים המלאים שלהם לא הושלמה בסבב הזה, ואין כאן טענה לאימות ביבליוגרפי מלא שלהם.

- Young, E. D., Kohl, I. E., Warren, P. H., Rubie, D. C., Jacobson, S. A., & Morbidelli, A. (2016). [S1] Oxygen isotopic evidence for vigorous mixing during the Moon-forming giant impact. *Science*, 351, 493–496. DOI: 10.1126/science.aad0525. Authors' version: arXiv:1603.04536
- Weber, R. C., Lin, P.-Y., Garnero, E. J., Williams, Q., & Lognonné, P. (2011). Seismic [S2] detection of the lunar core. *Science*, 331, 309–312. DOI: 10.1126/science.1199375
- Wieczorek, M. A., et al. (2013). The crust of the Moon as seen by GRAIL. *Science*, 339, 671– [S3] 675. DOI: 10.1126/science.1231530
- Andrews-Hanna, J. C., et al. (2014). Structure and evolution of the lunar Procellarum region [S4] as revealed by GRAIL gravity data. *Nature*, 514, 68–71. DOI: 10.1038/nature13697
- Roy, A., Wright, J. T., & Sigurdsson, S. (2014). Earthshine on a young Moon: Explaining the [S5] lunar farside highlands. *The Astrophysical Journal Letters*, 788, L42. DOI: 10.1088/2041-8205/788/2/L42. Authors' version: arXiv:1406.2020
- Murray, C. D., & Dermott, S. F. (1999). *Solar System Dynamics*. Cambridge University Press [S6] — מקור לפיזיקה המסלולית והגאותית, בהתאם למסגרת הייחוס של מאמרים 2 ו-4.
- Che, X., et al. (2021). Age and composition of young basalts on the Moon, measured from [S7] samples returned by Chang'e-5. *Science*, 374, 887–890 — מקור לתיארוך הבזלת; אינו מקור למשך החיבור בין כדור הארץ לירח.
- Zhang, Q. W. L., et al. *Lunar farside volcanism 2.8 billion years ago from Chang'e-6 basalts*. [S8] *Nature*. Published online November 2024; volume appearance 2025. DOI: 10.1038/s41586-024-08382-0. — פרטי הציטוט תוקנו ביחס לכתב היד המקורי; לא נעשה כאן שימוש באי-ודאות גיל ברמה של אלפי שנים בלי לקרוא את טבלת התיארוך המקורית.
- Hauri, E. H., Weinreich, T., Saal, A. E., Rutherford, M. C., & Van Orman, J. A. (2011). High [S9] pre-eruptive water contents preserved in lunar melt inclusions. *Science*, 333, 213–215. DOI: 10.1126/science.1204626
- Neumann, G. A., Zuber, M. T., Smith, D. E., & Lemoine, F. G. (1996). The lunar crust: Global [S10] structure and signature of major basins. *Journal of Geophysical Research*, 101, 16841–16863 — מקור סדר הגודל של היסט מרכז המסה שמצוטט בכתב היד המקורי; בדיקה וקטורית מלאה דורשת את ההגדרה של מרכז הצורה ואת רכיבי ההיסט של המודל שנבחר.
- Kleine, T., et al. (2009). Hf–W chronology of the accretion and early evolution of asteroids [S11] and terrestrial planets. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 73, 5150–5188 — מקור למסגרת הכרונומטרית; אינו אישור של חלון בנייה של 600 מיליון שנה.
- Head, J. W., Fassett, C. I., Kadish, S. J., Smith, D. E., Zuber, M. T., Neumann, G. A., & [S12] Mazarico, E. (2010). Global distribution of large lunar craters: implications for resurfacing and

impactor populations. *Science*, 329, 1504–1507. — מקור לאוכלוסיית המכתשים של 20 ק"מ ומעלה שבה נעשה שימוש ב-T2.

- Robbins, S. J. (2019). A new global database of lunar impact craters >1–2 km: 1. Crater [S13] locations and sizes, comparisons with published databases, and global analysis. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 124, 871–892. DOI: 10.1029/2018JE005592 — מקור קטלוג המכתשים שבו נעשה שימוש ב-(§B.8) T2.

כתבי היד של הסדרה שמצוטטים: Duran, Z. מאמר 1, *The Model*; מאמר 2, *LEF Mechanism in Principle*; מאמר 3, *LEF Mechanism in Practice*; מאמר 4, *The Orbit*; מאמר 5, *The Maria*; מאמר 6, *The Craters*; מאמר 7, *The Poles*; מאמר 8, *South Pole–Aitken*; מאמר 9, *The Stripes*; מאמר 10, *Mars*; מאמר 12, *Research topics* — אוקטובר 2026. כתבי היד של הסדרה הם המקור להגדרת המודל ולחישוביו, ולא ראיה חיצונית לנכונותו.

הצהרות

נתונים וחישובים: לא נוצר כאן קטלוג תצפיתי חדש ולא בוצעה התאמה חדשה למפות GRAIL. החישובים האנליטיים החדשים, הקלטים שלהם וההנחות שלהם מובאים בגוף המאמר ובנספח A. ההשוואות התצפיתיות נשענות על המקורות המפורטים.

מחבר: זוהר דוראן (Zohar Duran), חוקר עצמאי, רמלה, ישראל. ORCID: 0009-0005-3194-9387, לפי כתב היד המקורי.

מימון וניגוד עניינים: לפי הצהרת המחבר בכתב היד המקורי, לא התקבל מימון ציבורי או מסחרי, וקיימת בקשת פטנט זמנית בארצות הברית מס' 64/116,844, שהוגשה ב-22 ביולי 2026, עבור מתקן הנדסי הקשור למודל. ההצהרה הזאת מועתקת כהצהרת המחבר; מצב הבקשה לא נבדק כאן.