

THE LEF MODEL · A COMPANION TO THE SERIES

Lunar Elevation & Fission

12. נושאי מחקר

מה המודל פותח לחוקרים אחרים

חלקים 118 · A-K נושאים · שלוש רשימות לבחירה

זהר דוראן

חוקר עצמאי, רמלה, ישראל

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

תרגום מלא לעברית של המאמר האנגלי · 16 באוקטובר 2026

מודל LEF (Lunar Elevation and Fission — הרמה וביקוע של הירח) מציע שהירח נבנה מן החומר של כדור הארץ עצמו, בזמן שעוד היה מחובר לכדור הארץ. כדור ארץ חם ומהיר-סיבוב הרים שלוחה בצורת אגס מן החומר שלו עצמו; התכה עמוקה ועשירה בחומרים נדיפים הוזנה דרכה אל גוף שישב על קצהה; הקליפה החיצונית של כדור הארץ מעל האזור עלתה עם הגוף הזה כפני השטח של כיפה והפכה לקרום שלו; והגוף שוחרר כשמרכז המסה שלו הגיע אל קו הקורוטציה — המרחק שבו גוף שמסתובב עם כדור הארץ כבר נע במהירות של מסלול חופשי. מאמרים 1–11 של הסדרה מציגים את התהליך הזה, את המסלול, את הימות, את המכתשים, את הקטבים, את South Pole–Aitken, את הפסים של קרקעית האוקיינוס השקט, את הירחים של מאדים ואת הדרישות שהירח חייב לעמוד בהן.

מאמר זה הוא מאמר נלווה לסדרה. הוא אינו מחשב דבר חדש. הוא אוסף, מכל אחד-עשר המאמרים, את מה שהסדרה השאירה פתוח: דרישות שעדיין לא נבדקו, מחקרים שהוגדרו אך עדיין לא בוצעו, חישובים שהמאמרים מסמנים "לחישוב", והשורות שטבלת הסיכום של מאמר 1 מסמנת כחלקיות או כממתינות. אליהם נוספו חמש-עשרה שאלות ממחברות העבודה של הסדרה, תשע מהן הצעות של המחבר עצמו, שהמאמרים עדיין לא עסקו בהן. כל פריט כזה מנוסח כנושא מחקר שקבוצה אחרת יכולה לקחת ולהפוך למאמר בפני עצמו. פריטים שחוזרים בכמה מאמרים אוחדו לנושא אחד, וכל המקורות שלהם נשמרו.

יש 118 נושאים, המקובצים לפי תחום בעשרה חלקים (A–J): כדור הארץ לפני האגס ובזמנו; הגוף על הקצה; המסלול; הימות והפתחים; המכתשים ומקורם; הקטבים; South Pole–Aitken; הפסים והאוקיינוס השקט; מאדים וגופים אחרים; והדרישות ומבחני המפתח. כל נושא מוצג עם השאלה שלו במשפט אחד, מה המודל צופה (עם המספר מן הסדרה), הנתונים הקיימים או הנדרשים, השיטה, והיכן בסדרה הוא נדון. חלק K נותן שלוש רשימות לבחירה: שתי תצפיות המפתח של המודל, הנושאים שאפשר לבצע כבר עכשיו על נתונים ציבוריים, ואלה שדורשים הדמיה גדולה, משימת חלל או דגימות.

המודל מנוסח; הכיול שלו הוא עבודה לידיים רבות. מאמרים 1–11 מציגים תהליך אחד, מכדור ארץ חם ומהיר-סיבוב ועד ירח במסלולו של היום, ובודקים אותו מול הירח, כדור הארץ ומאדים. לאורך הדרך קבע כל מאמר מה התהליך דורש, והשאיר כמה מספרים לחישוב בכלים גדולים מאלה של מחבר יחיד: הדמיות תלת-ממדיות, משוואות מצב ב-50–150 ג'יגה-פסקל, אינטגרציות משולבות תרמיות-מסלוליות, עבודת מעבדה, משימות חלל ודגימות. אנו מציעים שאלה אינם פערים במודל אלא השלב הבא שלו. כל דרישה היא נושא למאמר של חוקר אחר; המודל קובע את השאלה ומציין את המספר שהוא מצפה לו. הדרישות של המודל, ומה שיבחן אותן, מרוכזים במאמר 11 (הדרישות).

118 נושאים, ולכל אחד המבחן שלו. כל נושא מציין את התצפית או את החישוב שמכריעים אותו. רובם כיול: הם יחדדו מספר שהסדרה נותנת כטווח (ההתפשטות של גוף האם החם, זמן הכשל של המגע, תולדות הפיזור האנרגטי של כדור הארץ). חלקם אישורים של חיזוי שכבר התקיים בחלקו (סדר האטימה של הימות, המכתשים הצעירים של הקטבים, האזור האיטי של האוקיינוס השקט). שניים הם תצפיות המפתח של המודל: הגאומטריה של אזורי החשיפה — האם הקרום ותיעוד המכתשים מסודרים בשלושה אזורים קונצנטריים סביב מרכז הצד הקרוב (נושאים 107–108) — ומקור המכתשים — האם החומר שיצר אותם הוא חומר ארצי חוזר, כפי שהמודל דורש, או חומר זר מחוץ למערכת כדור הארץ-ירח (נושאים 49–109).

מה המאמר אינו עושה. הוא אינו מחשב מחדש שום תוצאה, אינו משנה שום מספר של הסדרה ואינו מחליש שום טענה. המספרים המובאים הם המספרים של המאמרים, עם המאמר והסעיף, כדי שהקורא יוכל לפנות אל הגזירה המלאה. שני נושאים שהסדרה מציינת כעבודה עתידית — מערכת הצירים של כדור הארץ והירח, והמגנטיות של הירח — מוזכרים פעם אחת בסוף ואינם נמנים בין הנושאים.

מבוא — כיצד להשתמש במאמר הזה

המאמרים של הסדרה מספרים תהליך אחד לפי סדרו. כל אחד מהם, בחלקיו האחרונים, אוסף את מה שהוא דורש, את האופן שבו הוא נבחן ואת מה שהוא משאיר לעבודה נוספת. כשקוראים אותם בזה אחר זה, הרשימות האלה מפוזרות על פני אחד-עשר מאמרים וכמה מאות עמודים. מאמר זה מקבץ אותן למקום אחד ומנסח כל פריט כך שחוקר מחוץ לסדרה יוכל להתחיל ממנו בלי לקרוא קודם את הסדרה כולה.

מהו נושא. נושא מחקר, כאן, הוא שאלה פתוחה אחת של המודל שיכולה להיות נושא של מאמר בפני עצמו. הוא בא מאחד מחמישה מקומות: דרישה שנוסחה אך עדיין לא נבדקה (הדרישות R1–R18 של מאמר 11 (The Requirements)); מחקר שמאמר הגדיר, עם ספים שנקבעו מראש, אך לא ביצע; חישוב שמאמר מסמן כעדיין לביצוע; ושורה בטבלת הסיכום של מאמר 1 (The Model) (D.1§), שמסמנת כל טענה של הסדרה כמוצגת, חלקית או ממתינה — בצבעי רמזור, ירוק, כתום ואדום; ושאלה שעלתה במחברות העבודה של הסדרה, עם התשובה שהמודל מצפה לה, אך שאף מאמר עדיין לא עסק בה (חמישה-עשר נושאים, בסוף חלקים B, D, E, G, I ו-J). כשאותה שאלה מופיעה בכמה מאמרים, היא מובאת כאן פעם אחת, עם כל מקורותיה.

כיצד מוצג נושא. כל נושא נפתח בפסקה קצרה במילים פשוטות: במה עוסקת השאלה, ומדוע היא חשובה למודל. אחריה באות חמש שורות מתוילות. השאלה מנסחת אותה במשפט אחד. מה המודל צופה נותנת את המספר או את הכיוון שהסדרה מצפה להם, עם המאמר שבו הם מופיעים. נתונים אומרת מה קיים או מה נדרש. שיטה מציינת את הכלי. היכן בסדרה מפנה אל המאמר והסעיף ("מאמר 3 C.5§"), כדי שאפשר יהיה למצוא את הגזירה המלאה. המספרים הם מספרי הסדרה; אף אחד מהם אינו מחושב מחדש במאמר זה.

כיצד מקובצים הנושאים. חלקים A–J עוקבים אחרי התהליך של המודל ואחר כך אחרי המבחנים שלו: כדור הארץ לפני האגס ובזמנו, הגוף על הקצה — צורה, התעגלות, שחרור, המסלול, הימות והפתחים, המכתשים ומקורם, הקטבים, הפסים והאוקיינוס השקט, מאדים וגופים אחרים, דרישות ומבחני המפתח. הטבלה שלהלן מציגה את החלקים ואת הנושאים שבהם.

חלק	תחום	נושאים	מספרים
A	כדור הארץ לפני האגס ובזמנו	11	1–11
B	הגוף על הקצה — צורה, התעגלות, שחרור	12	12–23
C	המסלול	6	24–29
D	הימות והפתחים	14	30–43
E	המכתשים ומקורם	14	44–57
F	הקטבים	10	58–67
G	South Pole–Aitken	12	68–79
H	הפסים והאוקיינוס השקט	11	80–90
I	מאדים וגופים אחרים	16	91–106
J	דרישות ומבחני מפתח	12	107–118
K	כיצד לבחור — שלוש רשימות	—	—

עד כמה כל נושא מוכן. כל חלק נפתח בטבלה קטנה של הנושאים שלו. העמודה האחרונה שלה מראה, בצבע, מה חוקר צריך כדי להתחיל:

מוכנות	משמעות
נתונים ציבוריים	אפשר לבצע את הנושא כבר עכשיו, על נתונים שכבר פורסמו (קטלוגים, מפות, רשתות של כבידה וטופוגרפיה, נתונים איזוטופיים שפורסמו).
מידול חדש	הנתונים קיימים או שאין צורך בנתונים, אבל יש לבנות חישוב או הדמיה חדשים.
נתונים חדשים	הנושא דורש משימת חלל, דגימות שהובאו לכדור הארץ, ניסויי מעבדה או תצפיות חדשות.

כיצד להשתמש במאמר. לקורא יש שתי דרכים להיכנס. האחת לפי תחום: מומחה לגאות פונה לחלק C, מומחה למכתשים לחלקים E ו-F, סייסמולוג לנושאים 10 ו-89. השנייה דרך חלק K, שממין את הנושאים לשלוש רשימות לבחירה. הרשימה הראשונה מכילה את שתי תצפיות המפתח של המודל. הגאומטריה של אזורי החשיפה שואלת אם הקרום של הירח מתעבה בסדר קבוע מן המגע שבצד הקרוב, דרך הטבעת של הבסיס, אל הצד הרחוק, ואם תיעוד המכתשים העתיק ביותר עוקב אחרי אותם שלושה אזורים (נושאים 107 ו-108). מקור המכתשים שואל אם המתכת וההתכה שבתוך המכתשים נושאות את החתימה האיזוטופית של כדור הארץ, כפי שחומר חוזר חייב לשאת, או חתימה זרה (נושאים 49 ו-109). הרשימה השנייה מכילה את מה שאפשר לבצע כבר עכשיו על נתונים ציבוריים; השלישית, את מה שדורש הדמיה גדולה, משימת חלל או דגימות. סעיף מסכם מציין שני נושאים שנמצאים מחוץ למאמר זה ונשארים לעבודה עתידית.

חלק A — כדור הארץ לפני האגס ובזמנו

חלק A עוסק בגוף האם: כדור הארץ לפני שהירח עזב אותו. במודל, כדור הארץ באותו זמן היה חם, עשיר בחומרים נדיפים (חומרים כמו מים, שהופכים בקלות לגז), הסתובב פעם אחת בכחמש וחצי שעות, ועדיין הפריד את הברזל שלו לעבר המרכז. מאזור אחד שלו, ליד Kiriritimati של היום שבמרכז האוקיינוס השקט, עלתה שלוחה בצורת אגס מן החומר של כדור הארץ עצמו לעבר קו הקורוטציה, והירח נבנה על קצהה. הנושאים האלה חשובים משום שהם קובעים את תנאי הפתיחה של כל מה שבא אחריהם: כמה גדול היה גוף האם, היכן היה קו הקורוטציה שלו, האם ההתכה העמוקה שלו הייתה קלה מספיק כדי לעלות, האם הייתה לו האנרגיה להרים את הגוף ואת האגס, והאם האגס יכול היה לעמוד. רובם דורשים מידול חדש של מצב שהסדרה כבר הגדירה.

מס'	נושא	הכלי העיקרי	מוכנות
1	ההתפשטות התרמית של גוף האם החם	משוואת מצב	מידול חדש
2	בעיית Maclaurin השכבתית	צורה של גוף מסתובב	מידול חדש
3	היווצרות הליבה ותולדות Hf-W	מודל מאגרים	מידול חדש
4	משוואת המצב של ההתכה העמוקה	ניסויים, ab-initio	נתונים חדשים
5	אנרגיית ההרמה ואנרגיית גוף האם	התפתחות תרמית	מידול חדש
6	מבחן הלחץ עם האגס והפחיסות	שדה לא כדורי	מידול חדש
7	קצב הבנייה: שטף ההזנה	זרימה בצינור וקפיאה	מידול חדש
8	צורת שיווי המשקל של האגס (R9)	צורה עם פני שטח חופשיים	מידול חדש
9	הנטייה צפונה של האגס	גאומטריית נתיב ההזנה	מידול חדש
10	ליבת כדור הארץ בזמן האגס	מודל הידרוסטטי תלת-ממדי	מידול חדש
11	מסלול הביקוע הקלסי, בחישוב מחודש	שיווי משקל של נוזלים	מידול חדש

חלק A במבט אחד. עשרה מתוך אחד-עשר הנושאים הם חיוניים על גוף אם שהסדרה כבר הגדירה; אחד דורש נתוני מעבדה חדשים.

1 ההתפשטות התרמית של גוף האם החם

גוף חם גדול מאותו גוף כשהוא קר, וגוף מלא בחומרים נדיפים מומסים גדול עוד יותר. הגודל של כדור הארץ הצעיר חשוב משום שבמסה נתונה הוא קובע את חלון זמני הסיבוב שבו ההעברה יכולה לפעול. מאמר 2 (LEF Mechanism in Principle) מאמץ התפשטות של 120 ק"מ ומראה שהמודל פועל בטווח של ערכים; חישוב מלא יצמצם את הטווח הזה.

השאלה. בכמה היה כדור הארץ הקדום, החם והעשיר בחומרים נדיפים, גדול מכדור ארץ קר?

מה המודל צופה. מאומצת התפשטות של 120 ק"מ, וטווח של 520–98 ק"מ קביל. ההתפשטות קובעת את חלון זמני הסיבוב שבו ההעברה יכולה להתרחש: 5.54–4.90 שעות ב- $\Delta R = 120$ ק"מ (מאמר 2).

נתונים. הערכות של עומק אוקיינוס המאגמה הקדום (שכבה גלובלית של חומר מותך); מקדמי התפשטות של התכות סיליקטיות.

שיטה. אינטגרציה של משוואת מצב לכדור ארץ חם ועשיר בחומרים נדיפים. משוואת מצב קושרת בין לחץ, טמפרטורה וצפיפות; כשמבצעים עליה אינטגרציה מן המרכז החוצה, מתקבל הרדיוס.

היכן בסדרה. מאמר 2, פריט עבודה עתידית 3; D.3§.

2 בעיית Maclaurin השכבתית

ספרואיד Maclaurin הוא הצורה הפחוסה שמקבל גוף נוזלי אחיד בסיבוב יציב. כדור הארץ הצעיר של המודל לא היה אחיד: הברזל שלו שקע, ולכן החלק הפנימי שלו נעשה צפוף יותר מן החלק החיצוני. מיקום קו הקורטציה תלוי באופן שבו המסה מסודרת בפנים, ובקו הזה מתחיל הירח את מסלולו.

השאלה. היכן נמצא קו הקורטציה של גוף אם שהברזל שלו שוקע, כשהוא מחושב באופן עקבי עם עצמו?

מה המודל צופה. 17,569–15,382 ק"מ, מ- $D = 3$ עד $D = 1$, כאשר D הוא היחס בין צפיפות השכבה הפנימית לצפיפות השכבה החיצונית ($D = 1$ הוא גוף אחיד). ב- $D = 2$ הקו נמצא בכ-16,300–16,400 ק"מ. זהו מסלול הפתיחה של מאמר 4 המסלול (The Orbit) (מאמר 2).

נתונים. גוף האם של הסדרה: רדיוס נפחי 6,517 ק"מ, זמן סיבוב 5.5 שעות, מקדם מומנט התמד $k \gtrsim 0.397$. המקדם k מודד כמה מן המסה נמצא רחוק מן הציר: 0.4 לכדור אחיד, פחות לגוף עם ליבה צפופה.

שיטה. תורת Clairaut–Darwin–Radau לצורה של גוף מסתובב, המיושמת על גוף אם שהברזל שלו שוקע.

היכן בסדרה. מאמר 2, פריט עבודה עתידית 1; A.4.1, §A.6.2§; מאמר 1 F.2§.

3 היווצרות הליבה בזמן ההעברה, ותולדות המאגרים של Hf–W

הפניום-182 הוא איזוטופ רדיואקטיבי קצר חיים שמתפרק לטונגסטן-182. ההפניום נשאר בסיליקט, ואילו הטונגסטן הולך עם הברזל אל הליבה, ולכן העודף של W^{182} במאגר מתעד מתי נפרדה המתכת שלו. המודל דורש שליבת כדור הארץ עדיין תהיה בהיווצרות בזמן ההעברה, וכרונולוגיה אחת חייבת לשאת את חתימות הטונגסטן לאורך כל חלון הבנייה.

השאלה. האם הברזל של כדור הארץ עדיין שקע בזמן ההעברה (ריכוז $D \approx 2$), והאם כרונולוגיה אחת יכולה לשאת את חתימות הטונגסטן לאורך החלון של 600 מיליון שנה?

מה המודל צופה. גוף אם כמעט אחיד בהתחלה ($k \geq 0.397$). הליבה מתרכזת בזמן ההעברה, וזה מקצר את היממה בשחרור מ-6.44 ל-5.77 שעות (מאמר 2). העודף של Hf–W נקבע מוקדם בחלון ונישא בלי איפוס (מאמר 11).

נתונים. אנומליות W^{182} בדגימות ארציות וירחיות; יחסי Hf/W.

שיטה. מודל מאגרים של הפרדת מתכת מסיליקט לאורך החלון של 600 מיליון שנה, עם שיווי משקל חלקי בין המתכת לסיליקט.

היכן בסדרה. מאמר 2, תיבת הדרישות של חלק §D.3, D. מאמר 11 §D.2, מאמר 1 §F.2 ("תולדות המאגרים של Hf-W") ו-§D.1 (השורה הכתומה של מאמר 2).

4 משוואת המצב של ההתכה העמוקה, העשירה בחומרים נדיפים, ב-50–150 ג'יגה-פסקל

מבחן הלחץ של מאמר 3 (LEF Mechanism in Practice) שואל אם המקור העמוק יכול היה לדחוף את ההתכה שלו מעלה דרך האגס אל הגוף שעל קצהו. התשובה תלויה במספר אחד: הצפיפות של התכה עשירה במים ובפחמן דו-חמצני בלחצים של המעטפת העמוקה, 50–150 ג'יגה-פסקל (ג'יגה-פסקל אחד הוא כעשרת אלפים פעמים לחץ האוויר בגובה פני הים). התכה קלה יותר צריכה פחות לחץ כדי להתרומם, ולכן המבחן תלוי בשאלה עד כמה ההתכה הזאת קלה.

השאלה. האם התכה סיליקטית עשירה במים או בקרבונט קלה מכ-3,864 ק"ג/מ"ק לאורך העלייה?

מה המודל צופה. מבחן הלחץ עובר מתחת ל-3,864 ק"ג/מ"ק. ב-3,500 ק"ג/מ"ק נשאר מרווח של 10.49 ג'יגה-פסקל; ב-4,000 ק"ג/מ"ק הוא אינו עובר (מאמר 3).

נתונים. נתוני דחיסת הלם ונתוני תאי סדן יהלום על התכות עשירות במים ובקרבונט; דינמיקה מולקולרית מעקרונית ראשונית.

שיטה. ניסויים ודינמיקה מולקולרית *ab-initio* (הדמיות הנגזרות מן המכניקה הקוונטית של האטומים) בהרכבים הרלוונטיים, שנותנים את סף הצפיפות כפונקציה של תכולת החומרים הנדיפים.

היכן בסדרה. מאמר 3, פריט עבודה עתידית §D.13; A.9–A.10; שורה 1. מאמר 1 §F.2 ו-§E.1 ("התכה עמוקה קלה"). מאמר 11 §D.3 (שורה R6).

5 אנרגיית ההרמה ושחרור האנרגיה של גוף האם

הרמת מסה ירחית ואגס כבד ממנה פי כמה מתוך הכבידה של כדור הארץ עולה אנרגיה. המודל לוקח את האנרגיה הזאת מכדור הארץ עצמו: ברזל ששוקע אל הליבה משחרר אנרגיה כבידתית, כמו משקולת שמשחררים על חבל ומסובבת גלגל. הנושא שואל אם האספקה תואמת את העלות, ובאיזה קצב היא סופקה.

השאלה. האם כדור הארץ המתפתח משחרר את העבודה הנדרשת להרמת הגוף והאגס, ובאיזה קצב?

מה המודל צופה. הרמת הירח עולה בסדר גודל של 10^{30} ג'אול, והרמת האגס כ- 8×10^{30} ג'אול (פי 5.4 מן הירח). שקיעת הברזל משחררת בסדר גודל של 10^{31} ג'אול (מאמר 3).

נתונים. פרמטרים של היווצרות הליבה ושל התקררות תחת אטמוספירת אדים.

שיטה. מודל התפתחות תרמית של כדור ארץ שהברזל שלו שוקע, מתכווץ ומתקרר; מן התוצאות שלו — משך ההזנה.

היכן בסדרה. מאמר 3, פריט עבודה עתידית §4; §9C; A.12; ("אנרגיה"); §D.13 שורה 3. מאמר 1 §F.2 ("מאזן האנרגיה").

6 מבחן הלחץ חוזר, עם מסת האגס וגוף האם הפחוס

מבחן הלחץ של מאמר 3 נעשה בשדה של גוף אם כדורי. גוף אם שמסתובב פעם אחת ב-5.5 שעות הוא פחוס, והכבידה שלו חזקה בכיוונים מסוימים יותר משל כדור. הפחיסות נמדדת ב- J_2 , המקדם של שדה הכבידה שמתאר את הבליטה המשוונית. מאמר 3 כבר העריך את השפעתה; מה שנשאר הוא לבצע את המבחן במלואו כשהמסה של האגס עצמו כלולה בו.

השאלה. האם לחץ המקור עדיין מרים ומחזיק את הגוף ואת האגס בשדה של גוף אם פחוס?

מה המודל צופה. עם $J_2 \approx 0.036$ המשיכה פנימה גדלה ב-3% (5.4% על פני השטח המשווניים). עלות ההרמה גדלה בכ-4 ג'יגה-פסקל, בתוך המרווח של 10.49 ג'יגה-פסקל. עדיין יש להריץ את המבחן מחדש עם המסה של האגס עצמו (מאמר 3).

נתונים. הגאומטריה והמסה של האגס (מאמר 3 C.7§).

שיטה. המבחן המשולב של מאמר 3 A.9–A.13§, המבוצע בשדה לא כדורי.

היכן בסדרה. מאמר 3 C.9§ ("לחץ", "הפחיסות של גוף האם"); A.13§.

7 קצב הבנייה: שטף ההזנה לאורך החלון

מסה ירחית הייתה צריכה לעבור מעלה דרך האגס בזמן שהמודל מתיר. הזרימה של התכה צמיגה דרך מעבר גדלה בתלילות רבה עם רוחב המעבר — כחזקה הרביעית של הרדיוס שלו, b , כך שהכפלת הרוחב מגדילה את הזרימה פי שישה-עשר. מעבר רחב הוא אפוא דרישה של המודל, והנושא הוא לבדוק שמעבר ברוחב כזה מספק את המסה בזמן בלי לקפוא ולהיסתם.

השאלה. האם ההזנה נטו מספקת את המסה הפנימית בזמן העומד לרשותה (כ-400 + 100 + 100 מיליון שנה, ו-100 מיליון שנה כמקרה רגישות)?

מה המודל צופה. השטף רגיש לפתח כ- b^4 . נדרש מעבר שרדיוסו כ-1,000 ק"מ (0.46 מסות ירח; עומס צידי בסדר גודל של 10^{22} ניוטון) (מאמר 3).

נתונים. צמיגויות של ההתכה; רדיוסים של המעבר.

שיטה. מודל של זרימה בצינור ושל קפיאה בטווחי הצמיגות והפתח המותרים.

היכן בסדרה. מאמר 3 D.1§ שורה 2; A.11; §A.13; מאמר 1 E.1§ ("חיבור רחב, מסיבי וצמיגי").

8 צורת שיווי המשקל של האגס המחזיק את עצמו, ומאזן התנע הזוויתי שלו (R9)

האגס הוא החומר של כדור הארץ עצמו, הבולט מפני השטח לעבר קו הקורטציה. הוא חייב להחזיק את עצמו: הבסיס שלו חייב להיות רחב מספיק כדי לשאת אותו, והצורה שלו חייבת להיות צורה שכדור ארץ מסתובב, הנתון בלחץ פנימי, יכול לשמור עליה. מאמר 11 מונה זאת כדרישה R9. ההערכה הנוכחית משתמשת בחתכים עגולים בצפיפות אחידה; צורת שיווי משקל אמיתית תחליף אותה. אותה צורה קובעת גם כמה סיבוב האגס מעביר לירח.

השאלה. האם כדור ארץ מסתובב, הנתון בלחץ פנימי, מאפשר צורת שיווי משקל עם גוף על קצהה — בסיס של כ-9,000 ק"מ, ההולך וצר בקשת אחת אל מגע של 3,000 ק"מ, כולו בתוך קו הקורטציה — והאם הצורה הזאת סוגרת את מאזן התנע הזוויתי?

מה המודל צופה. הבסיס הצר ביותר שעוד מחזיק את עצמו גדל מ-7,800 ל-8,800 ק"מ (ב-3,000 ק"ג/מ"ק) בין ההתחלה לשחרור. מסת האגס היא 8.8–12.1 מסות ירח לבסיסים של 9,000–11,000 ק"מ. האגס מעביר לירח כשישית מן התנע הזוויתי של המערכת (כמות הסיבוב הכוללת); תנע זה נלקח מן הסיבוב של כדור הארץ ומקוזז בידי הליבה המתרכזת (מאמר 3).

נתונים. מצב גוף האם של הסדרה; אין צורך בתצפיות.

שיטה. צורת שיווי משקל עם פני שטח חופשיים, הכוללת את הכבידה של האגס עצמו לאורך צירו ואת הזרימה הפנימית. היא מחליפה את הערכת הרוחב המינימלי הנוכחית, המבוססת על חתכים עגולים בצפיפות אחידה.

היכן בסדרה. מאמר 3 §C.9, §C.8, C.7 ("הצורה עצמה", "תנע זוויתי וחום"). מאמר 11 §(R9) C.6. מאמר 1 E.1§ (R9), ממתינה). מאמר 2 §A.4.

9 הנטייה צפונה של האגס: הזנה מלכסנת ממקור מצפון לקו המשווה

בסיס האגס נמצא ליד קו המשווה, בכ- 1.9° צפון, ואילו הירח שוחרר מכ- 22.5° צפון. הקצה נטה אפוא צפונה. הסיבוב דוחף מסה מורמת לעבר קו המשווה, לא הרחק ממנו, ולכן הנטייה אינה יכולה לבוא מן הסיבוב. המודל מציב את הסיבה שלה בהזנה: המקור העמוק היה מצפון לקו המשווה והזין את האגס באלכסון.

השאלה. האם מקור עמוק מצפון לקו המשווה יכול להזין באלכסון מספיק כדי להעביר את הקצה מבסיס ליד 1.9° צפון אל כ- 22.5° צפון, נגד הדחיפה של הסיבוב לעבר קו המשווה?

מה המודל צופה. הנטייה באה מנתיב ההזנה, לא מן הסיבוב (מאמר 3).

נתונים. מיקום הבסיס (Kiritimati) ומיקום האזור האיטי של האוקיינוס השקט, הנקרא — בהסתייגות — כערימה שחורה.

שיטה. גאומטריה של המקור העמוק ושל נתיב ההזנה בגוף אם מסתובב ופחוס.

היכן בסדרה. מאמר 3 D.1§ ("האגס נוטה צפונה"); §B.1§; §A.4.

10 ליבת כדור הארץ בזמן האגס

אגס של כתשע מסות ירח העומד בצד אחד של כדור הארץ מזיז את מרכז המסה של כדור הארץ לעברו, והליבה הצפופה, הצפה במעטפת, הולכת אחריו. אחרי שהאגס נפל בחזרה, הליבה חזרה. המודל שואל אם האירוע הזה השאיר עקבה בליבה הפנימית, המרכז המוצק של כדור הארץ, שידוע שהחצי המזרחי והחצי המערבי שלה שונים זה מזה במהירות שבה גלים סייסמיים חוצים אותם.

השאלה. האם ליבת כדור הארץ נמשכה 270–370 ק"מ לעבר האגס כל עוד האגס עמד, והאם חזרה אחרי שהאגס נפל?

מה המודל צופה. תזוזה של 270 ק"מ בהתחלה (בסיס של 9,000 ק"מ), הגדלה ל-370 ק"מ בשחרור (בסיס של 11,000 ק"מ), וחזרה אחרי הפיצוי. מבנה חצי-כדורי של הליבה הפנימית, המיושר עם הצד של האגס, הוא התייעוד שיש לחפש (מאמר 3).

נתונים. האסימטריה מזרח-מערב של הליבה הפנימית בזמני ההתפשטות הסייסמיים; גיל הליבה הפנימית. המבחן נחלש אם הליבה הפנימית צעירה בהרבה מן הירח.

שיטה. מודל הידרוסטטי תלת-ממדי של כדור הארץ כשהאגס עומד ואחרי נפילתו, שעוקב אחרי החוסר שנשאר במקור.

היכן בסדרה. מאמר 3 E.5§; פריט עבודה עתידית 7.

11 מסלול הביקוע הקלסי, בחישוב מחודש

רעיון הביקוע הקלסי, מימי George Darwin ואילך, גרס שכדור ארץ נזלי מסתובב הופך לאליפסואיד מוארך (אליפסואיד Jacobi) ואחר כך לאגס שמתחלק. הוא נדחה משום שלמערכת כדור הארץ-ירח יש הרבה פחות מדי תנע זוויתי בשבילו. מאמר 2 מראה שההעברה המחוברת של מודל LEF צריכה כמעט בדיוק את התנע הזוויתי של היום. חישוב מודרני של המסלול הקלסי יהפוך את ההשוואה למדויקת.

השאלה. מה נותן חישוב מודרני של סדרת Jacobi ושל הענף בצורת אגס שלה עבור המסה והצפיפות האלה?

מה המודל צופה. המסלול הקלסי צריך פי 2.74 מן התנע הזוויתי של היום בנקודת ההתפצלות של Jacobi (הנקודה שבה הצורות המוארכות מתפצלות), לעומת 1.007 להעברה המחוברת (מאמר 2).

נתונים. טבלאות של סדרות Jacobi ו-Poincaré.

שיטה. סדרה נומרית של מצבי שיווי משקל של נזל מסתובב, עם אימות של נקודת צורת האגס.

היכן בסדרה. מאמר 2, פריט עבודה עתידית 6; § 6.5.A.

חלק B — הגוף על הקצה: צורה, התעגלות, שחרור

חלק B עוסק בירח כל עוד היה מחובר: גוף מוקצף על קצה האגס, שהוזן דרך בסיסו ועטוף בקליפה החיצונית של כדור הארץ. במודל הוא עבר התעגלות החוצה, פחיסות והתעגלות פנימה; המגע שלו עם האגס נעשה צר מ-6,000 ל-3,000 ק"מ; והוא השתחרר בקו הקורטציה. הנושאים האלה חשובים משום שהשלב המחובר הוא השלב שבו נוצרו הצורה של הירח, שני צדדיו השונים והקרום שלו. הם שואלים אם הגוף היה יציב, אם הקליפה שלו יכלה להיות קשיחה בזמן שהבסיס שלה נשאר נייד, כיצד הוא נעשה עגול, כיצד המגע נכשל, ומה הקרום בצד הקרוב ובצד הרחוק אמור להראות. שני נושאים נוספים שואלים מה השאירו הקצף והמגע בירח של היום: פאזות של לחץ גבוה בדגימות מאזור המגע, ונקבוביות שיורדת עם העומק. רובם חישובים והדמיות; שלושה (נושאים 19, 21 ו-23) אפשר לבדוק כבר עכשיו על נתונים ירחיים ציבוריים, ואחד (נושא 22) על דגימות שכבר הוחזרו.

מס'	נושא	הכלי העיקרי	מוכנות
12	הדמיה תלת-ממדית של הגוף המחובר	SPH / אלמנטים סופיים	מידול חדש
13	קליפה קשיחה מעל בסיס נייד	מאזן תרמי-ראולוגי	מידול חדש
14	מ- $a/c \approx 1.20$ אל גוף עגול	צורה אלסטית-צמיגה	מידול חדש
15	ההיסחפות של קו הרוחב של השחרור	אינטגרציה של שכבה צמיגה	מידול חדש
16	הידבקות Stefan וכשל המגע	מעבדה, נומרי	נתונים חדשים
17	הלחץ הכלוא בניתוק	מאזן תנע	מידול חדש
18	שרידות בתוך גבול רוש הנוזלי	חישוב ויסקו-אלסטי	מידול חדש
19	הקרום השכבתי של הצד הרחוק	הרכבי פסגות מרכזיות	נתונים ציבוריים
20	הקרום של הצד הקרוב מעל המגע	מודל תרמי, GRAIL	מידול חדש
21	KREEP כשפה הקרועה של הסיאל (R12)	מפות Th ו-K; אנורתוזיטים	נתונים ציבוריים
22	פאזות של לחץ גבוה בדגימות מאזור המגע	נתונים חדשים	
23	הנקבוביות של הירח כולו לפי עומק	נתונים ציבוריים	

חלק B במבט אחד. אל השלב המחובר מגיעים בעיקר דרך מידול; את שני הנושאים של הקרום ואת הנקבוביות לפי עומק אפשר להתחיל על מפות ירחיות קיימות; הפאזות של הלחץ הגבוה דורשות עבודת מעבדה על דגימות Apollo 14.

12 הדמיה תלת-ממדית של הגוף המחובר

הסדרה הגדירה את הגוף המחובר במלואו: המסה שלו, הצפיפות המוקצפת שלו, רוחב הקצה, הלחץ של ההזנה. מה שלא נעשה הוא להריץ את הגוף הזה קדימה בשלושה ממדים ולעקוב אחרי התפתחותו. הדמיה כזאת היא הבדיקה הישירה ביותר של מאמר 3: היא תראה אם הגוף עומד, ואם הוא עובר את השלבים בסדר שהמודל נותן.

השאלה. האם גוף במסת הירח, מוקצף ל-1,300 ק"ג/מ"ק על קצה של 6,000 ק"מ ומוזן דרך בסיסו ב-150 ג'יגה-פסקל, יציב? האם הוא עובר התעגלות החוצה, פחיסות והתעגלות פנימה, ומשתחרר עם המרווח המחושב?

מה המודל צופה. כיפה יציבה של כ-3,650 ק"מ. המגע מצטמצם מ-6,000 ל-3,000 ק"מ. סדר השלבים מתקדם היטב לפני הניתוק (מאמר 3).

נתונים. אין צורך; המצב ההתחלתי מוגדר במלואו בסדרה.

שיטה. הדמיה בשיטת חלקיקים מוחלקים (SPH) או באלמנטים סופיים עם גבול חופשי, יחד עם מודל תזמון משותף אחד להזנה, להתקררות ולכשל.

היכן בסדרה. מאמר 3, פריט עבודה עתידית 2; §D.1, השורות "גוף מחובר יציב" ו"סדר השלבים"; §A.5. מאמר 1 §E.3, §F.2.

13 קליפה קשיחה מעל בסיס נייד: הפתרון התרמי-ראולוגי המשולב

המודל דורש מן הקליפה החיצונית של כדור הארץ שני דברים בבת אחת. היא חייבת להיות קשיחה מספיק כדי לשמור על המכתשים שנוצרו עליה בזמן העלייה, משום שהמכתשים האלה הם התיעוד של הצד הרחוק. והשכבה שמתחתיה חייבת להישאר רכה מספיק כדי שהקליפה תוכל לעלות על הכיפה הגדלה. צמיגות, הנמדדת בפסקל-שנייה, היא התנגדות לזרימה; השאלה היא אם היסטוריית התקררות אחת נותנת צמיגות גבוהה למעלה ונמוכה למטה, למשך זמן מספיק.

השאלה. האם יש טווח ראולוגי אחד שבו הקליפה החיצונית נשארת קשיחה מספיק כדי לשמור על המכתשים שלה, בזמן שהממשק שמתחתיה נשאר נייד מספיק כדי לעלות על הכיפה?

מה המודל צופה. קליפה בעובי כ-18 ק"מ, בצמיגות של $\gtrsim 10^{23}$ פסקל-שנייה לאורך העלייה (דרישה, לא מדידה), מעל ממשק חלש בין הסיאל לסימה — השכבה החיצונית הקלה של כדור הארץ הקדום והשכבה הצפופה יותר שמתחתיה (מאמרים 3, 11). היווצרות התיעוד, שימורו והעלייה חייבים לחפוף בזמן (מאמר 6 המכתשים (The Craters)).

נתונים. חוקי צמיגות לקרום אנורתוזיטי ולקרום סיאלי; התקררות תחת אטמוספירת אדים.

שיטה. מאזן תרמי וראולוגי משולב לאורך הבנייה.

היכן בסדרה. מאמר 3 §D.1, השורה "חוץ שמתחזק ובסיס נייד"; §D.4; A.7; פריט 4. מאמר 11 §D.3, §D.1, ("עלייה ושימור"). מאמר 6 §O.1 ("תיעוד שנישא על הקליפה"). מאמר 1 §E.1 ("קליפה קשיחה").

14 הצעד מ- $a/c \approx 1.20$ אל גוף עגול לפני השחרור

בשלב המחובר המאוחר, עם יממה של 5.77 שעות וצפיפות ממוצעת של 2,600 ק"ג/מ"ק, גוף נוזלי היה ספרואיד Maclaurin פחוס, שהרדיוס המשווני שלו a גדול פי 1.20 בערך מן הרדיוס הקוטבי שלו c . בשחרור הירח חייב להיות קשיח ועגול. הסדרה מנסחת את הצעד הזה כדרישה; החישוב שמעביר את הגוף ממצב אחד לאחר הוא נושא בפני עצמו.

השאלה. כיצד מעבירה הקליפה הקשיחה את הגוף מיחס Maclaurin של כ-1.20 בשלב המחובר המאוחר (5.77 שעות, 2,600 ק"ג/מ"ק) אל גוף עגול בשחרור?

מה המודל צופה. בשחרור הגוף קשיח ועגול: מודול גזירה $\mu \geq 10$ ג'יגה-פסקל, יחס צירים ≤ 1.04 . זוהי דרישה, שאינה מחושבת בסדרה (מאמרים 2, 7 הקטבים (The Poles)).

נתונים. אין; חישוב.

שיטה. חישוב צורה אלסטית-צמיגה של גוף בעל קליפה תחת סיבוב יורד וצפיפות עולה.

היכן בסדרה. מאמר C.1§ 7 וחלק הפתיחה ("מה הוא דורש"). מאמר B.7§ 2. מאמר C.7§ 1.

15 ההיסחפות של קו הרוחב של השחרור אל מתחת ל-22.5°

קו הרוחב שבו שוחרר הירח הופך, במודל, לנטייה המסלולית הראשונה שלו, i_0 . בזמן שהמגע הצטמצם מ-6,000 ל-3,000 ק"מ, הגוף ישב על שכבה צמיגה, והסיבוב דחף אותו בעדינות לעבר קו המשווה. אם החליק בכלל, הוא החליק דרומה, ולכן קו הרוחב של השחרור יכול להיות רק נמוך מ-22.5°. גודל ההחלקה הזאת לא חושב.

השאלה. כמה רחוק החליק הגוף לעבר קו המשווה על שכבת המגע הצמיגה בזמן ההצטמצמות מ-6,000 ל-3,000 ק"מ?

מה המודל צופה. העיגון מחזיק את הגוף על הקצה הרחב; בהתעגלות החוצה יש לו חופש אבל מעט זמן. ההיסחפות יכולה רק להוריד את קו הרוחב, ולכן 22.5° הוא חסם עליון ל- i_0 (ו-25° כמקרה רגישות). גודלה אינו מחושב בסדרה (מאמרים 3, 4).

נתונים. עובי השכבה d_0 (20–50 ק"מ), הצמיגות שלה, ומשך שלב 3.

שיטה. האיבר המשיקי $\omega^2 r \sin \varphi \cos \varphi$ (הדחיפה של הסיבוב לעבר קו המשווה בקו רוחב φ), שהשכבה הצמיגה מתנגדת לו, באינטגרציה לאורך ההצטמצמות.

היכן בסדרה. מאמר C.5§ 3 ("מדוע הגוף לא החליק אל קו המשווה"); פריט עבודה עתידית 1. מאמר 4, חלק E. מאמר B.7§ 1.

16 הידבקות Stefan וזמן הכשל של המגע

קשה להפריד שני לוחות שטוחים שיש ביניהם שכבה דקה של נוזל: הנוזל חייב לזרום אל הרווח המתרחב, והזרימה הזאת מתנגדת. זוהי הידבקות Stefan. המגע של הירח עם האגס היה שכבה כזאת, שכבה מותכת בחלקה. האופן שבו היא השתחררה לבסוף — בחללים שנפתחו בה, בהיצרות, או במעבר מזרימה לשבירה — קובע כמה רחוק מעבר לקו הקורטציה שוחרר הירח.

השאלה. כיצד משתחררת שכבה מותכת בחלקה בין שני גופים — בקוויטציה, בהיצרות, במעבר מכשל צמיג לכשל שביר — ומתי?

מה המודל צופה. שלב איטי, ואחריו התדרדרות מהירה כשהרווח מגיע ל- $d = 3d_0$. מרווח השחרור הוא $\Delta r \approx 2d_0 \approx 210$ ק"מ מעבר לקו הקורטציה ($d_0 \approx 105$ ק"מ), שם החיפוש של מרחק השחרור במאמר 3, C.5a§ מוצא שהנטייה של היום והאקסצנטריות של היום נפגשות, כשקצת יותר ממחצית הירח כבר חצתה את הקו.

נתונים. הפרדה במעבדה של לוחות המחוברים בהתכה חלקית.

שיטה. עבודת מעבדה ועבודה נומרית על הידבקות Stefan לא-ניוטונית (נוזל שהצמיגות שלו משתנה עם קצב הזרימה), שנותנת את טווח המרווח ואת זמן השחרור.

היכן בסדרה. מאמר 3, פריט עבודה עתידית 5; §C.5a; C.5; (החיפוש של מרחק השחרור); D.1§, השורה "חיבור ושחרור". מאמר 1 F.2§ ("זמן הכשל של המגע") ו-D.1§ (השורה הכתומה של מאמר 3).

17 הלחץ הכלוא בנייתוק

מאמר 3 מונה שלושה גורמים בהיפרדות. אחד מהם הוא הלחץ שהוחזק מתחת לגוף ברגע שהשתחרר, כמו פקק שנדחף החוצה בידי הגז שמאחוריו. מאמר 4 מחשב את מהירות השחרור של הירח בלי האיבר הזה. הנושא הוא למצוא כמה הוא מוסיף.

השאלה. איזה חלק מן המהירות ההתחלתית של הירח בא מן הלחץ שהוחזק מתחת לגוף כשהשתחרר?

מה המודל צופה. הלחץ הכלוא הוא אחד משלושת הגורמים של ההיפרדות במאמר 3; הוא אינו נכלל במהירות השחרור של מאמר 4 (מאמר 7).

נתונים. אין; חישוב.

שיטה. מאזן תנע של השחרור עם הלחץ הכלוא, הבדק אם מהירות השחרור של מאמר 4 צריכה תיקון.

היכן בסדרה. מאמר 7, פריט עבודה עתידית 5; C.6§. מאמר 3 C.7–C.8§. מאמר 1 F.2§.

18 שרידות בתוך גבול רוש הנוזלי: פתרון העיוות

גבול רוש הוא המרחק שבתוכו הגאות של כוכב לכת קורעת ירח. הוא קטן יותר לגוף קשיח מאשר לגוף נוזלי, משום שגוף קשיח מתנגד למתיחה. הירח הצעיר השתחרר בכ-17,500 ק"מ (17,496 ק"מ, כ-210 ק"מ מעבר לקו הקורטציה; מאמר 3, C.5a§), מחוץ לגבול הקשיח אבל בתוך הגבול הנוזלי. המודל גורס שהוא שרד משום שכבר היה קשיח. הסדרה בודקת זאת בהערכת סדר גודל של המעוות; חישוב מלא יחליף אותה.

השאלה. האם גוף קשיח ברדיוס 1,890 ק"מ שורד 10^1 – 10^3 שנים בכ-17,500 ק"מ בלי עיוות מזיק, בלי התחממות ובלי איבוד מסה?

מה המודל צופה. הוא נמצא כ-7,200 ק"מ מעבר לגבול רוש הקשיח (10,314 ק"מ) ובתוך הגבול הנוזלי לצפיפות 2,600 ק"ג/מ"ק (19,971 ק"מ). הוא שורד משום שהוא קשיח (מאמרים 2, 4).

נתונים. אין; חישוב.

שיטה. חישוב ויסקו-אלסטי שמחליף את הערכת סדר הגודל של המעוות.

היכן בסדרה. מאמר 2, פריט עבודה עתידית 5; D.1§ ("שרידות"); נספח E. מאמר 4, חלק E ("בדיקת העיוות פתוחה"). מאמר 1 D.1§ (השורה הכתומה של מאמר 4).

19 הקרום השכבתי של הצד הרחוק

במודל הצד הרחוק נבנה שכבה על שכבה: סיאל שנאסף מפני השטח של כדור הארץ, וחומר חוזר שנחת על הקליפה העולה. השכבות המאוחרות היו קלות יותר ועשירות יותר בנוזלים. קרום שנבנה כך אמור להשתנות בהרכבו עם העומק, והצד הרחוק, שנבנה כך זמן רב יותר, אמור להראות את השינוי בחוזקה רבה יותר מן הצד הקרוב. הפסגות המרכזיות של מכתשים גדולים מעלות חומר מעומקים ידועים, ולכן הן פועלות כגלעיני קידוח טבעיים.

השאלה. האם תכולת הברזל של הקרום בצד הרחוק עולה עם העומק, בחוזקה רבה יותר מאשר בצד הקרוב?

מה המודל צופה. הצד הרחוק סיאלי, במובן של פני השטח של כדור הארץ הקדום, ובנוי בשכבות שהברזל שבהן עולה עם העומק. העובי שלו אינו תלוי בתולדות האגנים המקומיות (מאמר 3).

נתונים. הרכבי פסגות מרכזיות (Kaguya, Moon Mineralogy Mapper M³, LRO) עם עומק המוצא שלהם; חומר של Chang'e-6; שאריות GRAIL אחרי הסרת האגנים.

שיטה. הרכב הפסגות מול עומק המוצא, הצד הרחוק מול הצד הקרוב; מודל בנייה שחוזר את המדרגות.

היכן בסדרה. מאמר 3, פריט עבודה עתידית §6.1D; B.7 ("קרום שכבתי בצד הרחוק"); §4.D פריט 8. מאמר 1 F.3§ פריט 3.

20 הקרום של הצד הקרוב מעל המגע

כשהגוף התקלף מן האגס, הטבעת של הכיפה התחתונה התקלפה יחד עם הסיאל שלה והפכה לחגורת הקצה, טבעת הקרום שסביב הצד הקרוב. מעל המגע של 3,000 ק"מ עצמו, החום של החיבור התיך את הסיאל והחליק אותו. העומק שאליו הגיעה ההתכה הזאת אמור לקבוע עד כמה הקרום מעל המגע דק לעומת החגורה שסביבו.

השאלה. לאיזה עומק התיך החום של המגע את הסיאל, והאם זה נותן את עובי הקרום מעל המגע לעומת עובי חגורת הקצה?

מה המודל צופה. הטבעת של הכיפה התחתונה התקלפה יחד עם הסיאל שלה (חגורת הקצה). מעל המגע של 3,000 ק"מ הסיאל הותך והוחלק (מאמרים 3, 11).

נתונים. מודלים של עובי הקרום מ-GRAIL.

שיטה. מודל תרמי של המגע, בהשוואה לקרום הנמדד.

היכן בסדרה. מאמר 3, פריט עבודה עתידית §8.4a.C. מאמר 11 §4.C.

21 KREEP כשפה הקרועה של הסיאל (R12)

KREEP הוא רכיב של החומר הירחי העשיר באשלגן (K), ביסודות אדמה נדירים (REE) ובזרחן (P), והוא מרוכז בצד הקרוב סביב Oceanus Procellarum. המודל קורא אותו כשפה הקרועה של הסיאל של כדור הארץ: כשהגוף התקלף, שפת הסיאל בשולי הבסיס התקפלה פנימה. אם כך, הסיאל שנשאר במקומות אחרים — האנורטוזיטים הפרימיטיביים ביותר — אמור היה לאבד את האשלגן ואת התוריום שעברו אל KREEP.

השאלה. האם KREEP ממקם בשולי הבסיס, סביב Procellarum, והאם האנורטוזיטים הפרימיטיביים ביותר איבדו את ה-K וה-Th של הסיאל של כדור הארץ?

מה המודל צופה. השפה הקרועה של הסיאל התקפלה פנימה בשולי הבסיס כשהגוף התקלף (מאמרים 3, 11).

נתונים. מפות התוריום והאשלגן של Lunar Prospector ושל Kaguya; הרכבי אנורטוזיטים.

שיטה. הפיזור של KREEP מול שולי הבסיס; יסודות קורט באנורטוזיטים פרימיטיביים.

היכן בסדרה. מאמר 11 §(R12) 6.C. מאמר 3 §10.C. מאמר 1 §1 E.(R12), ממתינה).

22 פאזות של לחץ גבוה מלחץ איטי בדגימות מאזור המגע

כל עוד הגוף היה מחובר, הפנים התחתונות שלו נלחצו אל ראש האגס, וכשהמגע הצטמצם מ-6,000 ל-3,000 ק"מ, אותו עומס נישא על שטח קטן והולך: הלחץ על המטרים החיצוניים של הפנים האלה עלה ככל שהמגע הצטמצם. ההצעה של המחבר היא שהלחץ הזה היה גדול אבל איטי. להבחנה הזאת יש משמעות למה שהדגימות רושמות. גל הלם, שעובר בשבריר שנייה, הופך פלדספר למסקליניט, זכוכית שנוצרת במצב מוצק; לחץ באותו גודל שמופעל לאט נותן למינרלים זמן להיבנות מחדש כפאזות גבישיות צפופות — קואזיט וסטישוביט מצורן דו-חמצני, ג'דאית מפלדספר. חומר חוזר שנחת יצר סימני הלם בכל מקום בירח. דגימות מן הקרקע

שנלחצה אל האגס צריכות לשאת, בנוסף, את הפאזות הגבישיות של לחץ גבוה. אתר Apollo 14, ב-Fra Mauro, נמצא בתוך כיפת המגע, כ-29° ממרכז המגע. עדיין לא נבדק אם הדגימות שלו מכילות את הפאזות האלה.

השאלה. האם דגימות מכיפת המגע — ובראשן Apollo 14 ב-Fra Mauro — מכילות פאזות של לחץ גבוה שנוצרו בלחץ איטי (קואזיט, ג'דאיט, סטישוביט), ולא רק זכוכית הלם?

מה המודל צופה. הלחץ על המגע פעל לאט, ולכן יצר פאזות גבישיות של לחץ גבוה ולא מסקליניט, שדורש גל הלם. דגימות מתוך כיפת המגע נושאות את הפאזות האלה; דגימות דומות מן החגורה נושאות סימני הלם בלבד. היעדרן מן הכיפה, או נוכחות שווה בכיפה ובחגורה, אינם תומכים בקריאה הזאת.

נתונים. דגימות קיימות של Apollo 14 מתצורת Fra Mauro, 3.6° דרום 17.5° מערב (אוסף הדגימות הירחיות של NASA); כביקורת, דגימות רמות מאותו סוג מ-Apollo 16 ומ-Apollo 17, שתיהן כ-51° ממרכז המגע, בחגורה.

שיטה. ספקטרוסקופיית ראמאן, מיקרוסקופיה אלקטרונית ואנליזת מיקרו-בדיקה של שקפים דקים, בחיפוש אחר קואזיט, סטישוביט וג'דאיט ותיעוד המרקמים שלהם לצד כל מסקליניט שיימצא; אותו הליך על דגימות הביקורת, עם אמות מידה שנקבעות לפני קריאת השקפים.

היכן בסדרה. עדיין לא בסדרה; עלה ברשימות העבודה של המחבר (האוסף של 16.10.2026). כיפת המגע (0–31° סביב 24.1° צפון 335.2° מזרח) היא זו של מאמר B.4§ 3 ומאמר B.8§ 11; הצטמצמות המגע — מאמר 3 C.4–C.5§.

23 הנקבוביות של הירח כולו לפי עומק: הרישום של הקצף

במודל הגוף התחיל כקצף, כ-1,300 ק"ג/מ"ק בתחילת ההתעגלות, שהתהדק ל-2,600 ק"ג/מ"ק בשחרור ול-3,344 ק"ג/מ"ק היום. קצף שמתהדק תחת משקלו שלו סוגר את נקבוביו רק במקום שבו הלחץ גבוה מספיק, ומשקל העמודה שמעל גדל עם העומק. לכן המודל מצפה לירח מהודק בעומק עם קרום עליון נקבובי: הנקבוביות ששרדו הן שארית הקצף קרוב לפני השטח. GRAIL מודד את הנקבוביות ישירות, דרך הצפיפות הכוללת של הקרום: כ-2,550 ק"ג/מ"ק, קל יותר מן הגרגרים שהוא בנוי מהם, מה שמתאים לנקבוביות ממוצעת של כ-12% בקרום. מאמר 8 קרא את הנקבוביות בפני השטח ובעומק 10 ק"מ עבור South Pole–Aitken וסביבתו (נושא 77); אותה קריאה עבור הירח כולו עדיין לא נעשתה.

השאלה. האם הנקבוביות של הירח כולו, ולא רק של South Pole–Aitken, יורדת עם העומק כפי שקצף שהתהדק בלחץ צריך להשאיר אותה, ובאיזה עומק הנקבוביות נסגרות?

מה המודל צופה. הקצף קרס במקום שבו הלחץ הספיק; נקבוביות שרידית שורדת בקילומטרים העליונים, והגוף העמוק מהודק. נקבוביות שאינה יורדת עם העומק, או שעולה איתו, אינה תומכת בקריאה הזאת. ירידה עם העומק צפויה גם מנקבוביות שנפתחו בשבירה בפני השטח; לכן המבחן הוא עומק הסגירה והפיזור שלו על פני הירח, מול קצף שהתהדק מבפנים.

נתונים. רשתות של צפיפות כוללת, צפיפות גרגרים ונקבוביות מ-GRAIL (Wieczorek et al. 2013), עם מודלי העומק הליניארי והמעריכי של Besserer et al (2014). לשם השוואה, מאמר 8 מצא 18.9%–20.3% בפני השטח, ובעומק 10 ק"מ 6.2%–7.9% ברמות הצד הרחוק ו-9.6%–12.8% בשאר הצד הרחוק.

שיטה. ממוצעים משוקללי שטח של הנקבוביות בפני השטח ובעומק, באזורי החשיפה ועל פני הירח כולו, כשהימות והאגנים הגדולים ממוסכים בכל אזור באותו אופן; עומק הסגירה מושווה למודל הידוק של הקצף תחת משקלו שלו.

היכן בסדרה. מאמר B6§ 8 (הנקבוביות של South Pole–Aitken ושל הצד הרחוק); מאמר C.3§ 7 (ההידוק מ-1,300 ל-3,344 ק"ג/מ"ק); מאמר 2 נספח G, שורה E42 (חומרים נדיפים ונקבוביות). הקריאה עבור הירח כולו עלתה ברשימות העבודה של המחבר (האוסף של 16.10.2026). נושא 92 שואל את אותה שאלה על Phobos ו-Deimos.

חלק C — המסלול

חלק C עוסק בירח אחרי השחרור. במודל הוא יצא כ-210 ק"מ מעבר לקו הקורוטציה (מאמר 3, §C.5a), כ-17,500 ק"מ ממרכז כדור הארץ, במסלול כמעט מעגלי הנוטה בזווית של קו הרוחב של השחרור, 22.5° , ואחר כך הגאות נשאה אותו החוצה עד 384,400 ק"מ. שני גדלים מתארים את המסלול: הנטייה, ההטיה של מסלול הירח ביחס לקו המשווה של כדור הארץ או למישור המילקה, והאקסצנטריות, המידה שבה המסלול סוטה ממעגל. הנושאים האלה חשובים משום שהמסלול הוא הקשר של המודל בין מקום השחרור על כדור הארץ לבין הירח שאנו רואים היום. הם מבקשים את האינטגרציה המלאה ממצב השחרור, את תולדות הגאות של כדור הארץ, את הצעדים הראשונים של ההתרחקות, את ההתקררות של ירח חד-צדדי, ואת התייעוד של צורתו המוקדמת.

מס'	נושא	הכלי העיקרי	מוכנות
24	אינטגרציה תרמית-מסלולית משולבת	אינטגרטור סקולרי	מידול חדש
25	תולדות הפיזור האנרגטי של כדור הארץ	מודלים של תהודת אוקיינוסים	מידול חדש
26	תחילת ההתרחקות	אינטגרציה גאותית	מידול חדש
27	המעבר של אוקיינוס המאגמה למכסה חד-צדדי	מודל תרמי אסימטרי	מידול חדש
28	הצורה המאובנת	גאומטריית הסגירה, GRAIL	מידול חדש
29	קו הרוחב הקדום, בשחזור	שחזור מבני	מידול חדש

חלק C במבט אחד. אל המסלול מגיעים דרך אינטגרציה; הנתונים (מדידת מרחק בלייזר לירח, הרכיבים המסלוליים של היום, GRAIL) כבר קיימים.

24 האינטגרציה התרמית-מסלולית המשולבת ממצב השחרור

מאמר 4 עוקב אחרי הירח מן השחרור ועד היום בעזרת חוק מצומצם, ומגיע ל- 5.145° במרחק של היום, הערך הנמדד. המבחן המלא הוא אינטגרציה שעוקבת אחרי הגאות בשני הגופים בזמן שהם מתקררים, ועוברת דרך שני מעברים: מעבר מישור Laplace, שבו המישור שסביבו המסלול נוקף משתנה מקו המשווה של כדור הארץ אל מישור המילקה, ומצב Cassini, ההתאמה היציבה של ציר הסיבוב של הירח למסלולו.

השאלה. האם מצב השחרור ($r_0 = 17\,496$ ק"מ, $a_0 \approx 18\,163$ ק"מ, $e_0 \simeq 0.037$, $i_0 = 22.5^\circ$, יממה של 5.77 שעות, J_2 המשתנה כ- ω^2) מתפתח לנטייה של היום, 5.145° , לאקסצנטריות של היום ולמרחק של 384,400 ק"מ בתוך 3.873 מיליארד שנה?

מה המודל צופה. החוק המצומצם נותן 5.145° במרחק של היום (5.788° מ- 25°). המבחן המלא עובר דרך מעבר מישור Laplace ודרך מצב Cassini (מאמר 4).

נתונים. מדידת מרחק בלייזר לירח; הרכיבים המסלוליים של היום.

שיטה. אינטגרטור סקולרי (כזה שעוקב אחרי השינוי האיטי, הממוצע, של המסלול) עם פיזור אנרגטי תלוי זמן בשני הגופים. אינטגרציה ניוטונית קצרה בודקת את האליפסה ההתחלתית עם כל מהירות היפרדות ועם השדה

היכן בסדרה. מאמר 4, פריט עבודה עתידית 1; חלק E, השורות "הנטייה של היום" ו"האליפסה ההתחלתית"; D.1§. מאמר 1 F.2§ ו-D.1§ (השורות הכתומות של מאמר 4).

25 תולדות הפיזור האנרגטי של כדור הארץ

הירח מתרחק משום שהגאות שהוא מעורר על כדור הארץ נישאת מעט לפניו בסיבוב של כדור הארץ ומושכת אותו קדימה. עד כמה חזק — תלוי בתגובה הגאותית של כדור הארץ, הנכתבת $k_2/k_2/Q$ מודד כמה כדור הארץ מתעוות, ו- Q כמה מעט מן העיוות הזה הולך לאיבוד כחום (Q נמוך פירושו פיזור חזק). שום Q קבוע אינו מתאים גם לקצב ההתרחקות של היום וגם לגיל הירח, ולכן Q השתנה בהכרח, ככל הנראה עם הצורה של אגני האוקיינוסים.

השאלה. איזו פונקציית קצב $k_2/Q(t)$, המתחילה מן היממה של 5.77 שעות, מתאימה גם להתרחקות של היום (3.8 ס"מ לשנה) וגם לגיל מאז השחרור?

מה המודל צופה. שום Q קבוע אינו מתאים לשניהם: $Q \approx 12$ נותן את הקצב של היום, $Q \approx 29$ נותן את 3.87 מיליארד השנים (מאמר 4).

נתונים. ריתמיטים גאותיים (משקעים שכבתיים שמתעדים גאות קדומה ואורכי יממה); תיעוד של אורך היממה בעבר; הגאומטריה של אגני האוקיינוסים.

שיטה. מודלים של תהודת אוקיינוסים בכדור הארץ הקדום.

היכן בסדרה. מאמר 4, פריט עבודה עתידית 2; D.2–D.3§. מאמר 2, פריט עבודה עתידית 2. מאמר 1 D.1§ ("מרחק ושעון", ממתינה).

26 תחילת ההתרחקות

הירח שוחרר רק כמה עשרות קילומטרים מעבר לקו הקורוטציה. מחוץ לקו הזה הגאות של כדור הארץ מושכת את הירח קדימה והוא נע החוצה; בתוכו, הגאות הייתה מושכת אותו אחורה. המודל דורש שההתרחקות תתחיל מיד. אינטגרציה גאותית ממצב השחרור תראה את הקצב במסלולים הראשונים.

השאלה. באיזה קצב מתחיל הירח להתרחק לאחר שחרור כמה עשרות קילומטרים מעבר לקו?

מה המודל צופה. $\langle a \rangle > 0$ מן המסלול הראשון, כאשר $\langle a \rangle$ הוא הקצב הממוצע של השינוי ברדיוס המסלול (מאמרים 2, 4).

נתונים. אין; חישוב.

שיטה. אינטגרציה גאותית עם ראולוגיה תלוית תדר בשני הגופים, המתחילה ממצב השחרור של מאמר 3.

היכן בסדרה. מאמר 2, פריט עבודה עתידית 4; B.8§. מאמר 4 B.2§.

27 המעבר של אוקיינוס המאגמה למכסה חד-צדדי

הירח הצעיר היה מותך בחלקו, וירח מותך מפזר אנרגיה גאותית באופן שונה מאוד מירח מוצק. מאמר 4 מראה ששרידות הנטייה תלויה בשאלה מתי התרחש ה"מעבר" הזה ממותך למוצק. המודלים שפורסמו לאוקיינוס המאגמה של הירח סימטריים; הירח של המודל אינו סימטרי. המכסה שלו היה עבה בצד הרחוק ודק בצד הקרוב, והוא היה מתקרר באופן שונה.

השאלה. מתי סיים ירח, שהמכסה שלו עבה בצד הרחוק ודק בצד הקרוב, להתמצק, והאם זה היה לפני 20 רדיוסי כדור הארץ?

מה המודל צופה. שרידות הנטייה תלויה במעבר הזה (מאמר 4).

נתונים. מודלים שפורסמו לאוקיינוס המאגמה, שהם סימטריים.

שיטה. מודל תרמי של ירח עם מכסה אסימטרי.

היכן בסדרה. מאמר 4, פריט עבודה עתידית 4; D.2§.

28 הצורה המאובנת

הצורה של הירח סוטה מעט מן הצורה שגוף נוזלי היה מקבל היום; היא "מאובן" מזמן מוקדם יותר. הסטייה מתוארת בשני מקדמים של שדה הכבידה מדרגה 2: J_2 , הפחיסות הקוטבית, ו- C_{22} , ההתארכות לעבר כדור הארץ. במודל הגוף לא קיבל את הצורה הזאת בנעילה גאותית מאוחרת; הוא שמר על הצורה שנקבעה כשהכיפה נסגרה, והוא שמר על פן אחד מופנה אל כדור הארץ מן השלב המחובר ואילך.

השאלה. האם הצורה שהשאירה סגירת הכיפה תואמת את הצורה של הירח היום בדרגה 2, והאם הסיבוב הסינכרוני נשמר מן השלב המחובר?

מה המודל צופה. הגוף נושא את צורתו מן הסגירה, לא מנעילה גאותית מאוחרת. הוא שמר על פן אחד מופנה אל כדור הארץ מן השלב המחובר (מאמר 4; מאמר 11, R4).

נתונים. כבידה מדרגה 2 של GRAIL; צורה מ-LOLA.

שיטה. גאומטריית הסגירה של מאמר 3 נותנת J_2 ו- C_{22} חזויים, ואותם משווים לערכים של היום.

היכן בסדרה. מאמר 4, פריט עבודה עתידית 5; C.3§. מאמר 11 §B.4 (R4), A.4.

29 הקשר הגאוגרפי: קו הרוחב הקדום בשחזור עצמאי

במודל הנטייה הראשונה של הירח היא קו הרוחב של השחרור שלו, $i_0 = |\lambda|$, וקו הרוחב הזה נקבע על ידי מרכז המגע על כדור הארץ, 22.5° . מאמר 4 משתמש בערך הזה; הוא עדיין לא שוחזר באופן עצמאי. שחזור מן המבנה של אזור המקור באוקיינוס השקט ומן הסיבוב של הירח עצמו, בלי התאמה למסלול, יבדוק את הקשר בין המקום על כדור הארץ לבין המסלול בשמים.

השאלה. האם אפשר לשחזר את קו הרוחב של מרכז המסה של הירח בשחרור מן המבנה ומן הסיבוב בלבד, בלי להתאים אותו למסלול?

מה המודל צופה. 22.5° , מרכז המגע של 3,000 ק"מ. הזהות $i_0 = |\lambda|$ עומדת ללא תלות בשחזור (מאמר 4).

נתונים. המבנה של האוקיינוס השקט (נושאים 80–90); מרכז המגע על הירח.

שיטה. שחזור מבני וסיבובי.

היכן בסדרה. מאמר 4, חלק E, השורה "קשר גאוגרפי". מאמר 1 D.1§ (השורה הממתינה של מאמר 4).

חלק D — הימות והפתחים

במודל, ים אינו אגן שהוצף אחרי פגיעה; הוא פתח מעל כיפת הזנה: מקום שבו התכה חמה ועשירה בנדיפים עלתה מלמטה דרך הקליפה של הגוף שישב על האגס של כדור הארץ, ומאוחר יותר נשפכה החוצה כבזלת (מאמר 3 (LEF Mechanism in Practice), מאמר 5 (The Maria)). הפתחים נחשפו בסדר קבוע, ככל שחזית הכיסוי הנסוג עברה מעליהם, וכל אחד מהם נאטם כשאספקת ההתכה שהחזיקה אותו פתוח פסקה. חלק זה אוסף את הנושאים שבודקים את התמונה הזאת ים אחר ים: האם כל פתח חי מספיק זמן, באיזה סדר נאטמו הפתחים, מה רושמים התוריום והטיטניום מעל כיפות ההזנה, מה מראים השפות והצווארונים של הימות, ומה השאירו הפתחים מתחתם ומסביבם: המערות כחללי אדים, קפיצת הקרום לפי גיל האגן, קוטר הפתח לפי משך ההזנה, השפה כרישום שכבות, הפסגות בצד המישור, והכבידה של המכתשים שנעלמו בתוך הימות הפעילים. הנושאים האלה חשובים משום שהימות הם הטענה הגלויה ביותר של המודל על הצד הקרוב: אם הפתחים לא התנהגו כפתחים, האסימטריה של הצד הקרוב זקוקה לסיבה אחרת.

הטבלה מונה את ארבעה-עשר הנושאים. העמודה האחרונה מציינת את המוכנות: ירוק פירושו שאפשר לבצע את העבודה כבר עכשיו על נתונים ציבוריים; כתום פירושו שהיא דורשת מידול חדש; כחול פירושו שהיא דורשת משימה, דגימות או נתונים שעדיין אינם בידנו.

מס'	נושא	מוכנות
30	המנוע של הפתחים: שטף קריטי וזמני אטימה	מידול חדש
31	סדר האטימה	נתונים ציבוריים
32	תוריום ברזולוציה גבוהה מעל כיפות ההזנה	נתונים ציבוריים
33	טבעת השפה של הימות עשירי הנדיפים	נתונים ציבוריים
34	חשיפה הדרגתית בתוך ים אחד	נתונים ציבוריים
35	פתחי פליטה וצינורות: אופי הפתח לפי האזור	נתונים ציבוריים
36	חלק הטיטניום של מחקר 13	נתונים ציבוריים
37	הצווארון של הימות הפתוחים בצד הרחוק	נתונים ציבוריים
38	הבורות והמערות של הירח: חללי אדים, לא צינורות לבה	נתונים ציבוריים
39	קפיצת הקרום מתחת לפתח לפי גיל האגן	נתונים ציבוריים
40	קוטר הפתח לפי משך ההזנה	נתונים ציבוריים
41	השפה של ים כרישום שכבות: גובה השפה ומשך הפליטה	נתונים ציבוריים

42	קהה או חדה: הפסגה במקום שבו השפה של מכתש גדול חסרה בצד המישור	נתונים ציבוריים
43	סימני הכבידה של המכתשים שנעלמו בתוך הימות הפעילים	נתונים ציבוריים

שלושה-עשר מתוך ארבעה-עשר הנושאים אפשר להתחיל על מפות וקטלוגים שכבר פורסמו. רק הראשון, המנוע של הפתחים, דורש חישוב שעדיין לא נכתב.

30 המנוע של הפתחים: שטף קריטי וזמני אטימה

פתח נשאר פתוח כל עוד ההתכה שעוברת בו מביאה חום מהר כפי שהדפנות מאבדות אותו לקליפה הקרה שסביבן; כשהזרימה נחלשת אל מתחת לרמה הזאת, ההתכה בצינור קופאת והפתח נאטם. מאמר 5 מנסח את המאזן הזה כמשוואה (4) שלו, ודורש שכל פתח שיצר ים האריך ימים מעבר לרגע שבו חזית החשיפה הגיעה אליו. החישוב של כמה זמן חי כל פתח בפועל עדיין לא נעשה.

השאלה. האם, בכל ים, הפתח נשאר חי עד שהחזית הנסוגה חשפה אותו?

מה המודל צופה. פתח נאטם כשהשטף של ההתכה יורד אל מתחת לשטף הקריטי — השטף שבו החום המובא פנימה מאזן את החום שאובד בהתקררות (מאמר 5, משוואה 4). המודל דורש שהפתחים האריכו ימים מעבר לחשיפתם.

נתונים. שטחי הימות, עומקיהם וגילם; דורות החשיפה של מאמר 5, I.4§.

שיטה. חישוב של השטף הקריטי ושל זמן האטימה לכל ים, מול הזמן שבו החזית חשפה אותו.

היכן בסדרה. מאמר 5, פריט עבודה עתידית 1, H.3, I.6, M.3§§ ("המנוע"); מאמר 1 (The Model), F.2§, טבלת החישובים הפתוחים ("המנוע של הפתחים").

31 סדר האטימה

אם הפתחים הוזנו מן המגע — האזור שנגע אחרון בעמוד של כדור הארץ — הרי שהפתחים הקרובים ביותר למגע היו האחרונים שאיבדו את אספקתם. הבזלות הצעירות ביותר שלהם צריכות אפוא להיות צעירות מאלה של הימות הרחוקים יותר. במבחן כזה יש להחזיק את התוריום קבוע, משום שהאזור העשיר בתוריום בצד הקרוב (האזור המועשר באשלגן, ביסודות אדמה נדירים ובזרחן, המכונה KREEP) נשאר חם זמן רב יותר מסיבות שלו — החום הרדיואקטיבי שלו עצמו.

השאלה. האם הבזלת הצעירה ביותר של כל ים נעשית צעירה יותר ככל שמתקרבים למרכז המגע, כשהתוריום מוחזק קבוע?

מה המודל צופה. ימות המגע נאטמו אחרונים (מאמר 5).

נתונים. גילים מספירת מכתשים וגילים רדיומטריים של היחידות הצעירות ביותר בכל ים (למשל גילי היחידות של Hiesinger ועמיתיו); מפות תוריום.

שיטה. רגרסיה של הגיל הצעיר ביותר על המרחק הזוויתי ממרכז שנקבע לפני שהנתונים נבחנו, עם התוריום כמשתנה מתאם.

היכן בסדרה. מאמר 5, פריט עבודה עתידית 6, K.2, M.3§§; מאמר 1, F.3§, פריט 8.

32 תוריום ברזולוציה גבוהה מעל כיפות ההזנה

מאמר 5 דורש שהתוריום יהיה נמוך ביותר בדיוק מעל התעלות של כיפות ההזנה, משום שההתכה שעלתה דרכן באה מתחת לשכבה נושאת התוריום ודיללה אותה. מפות התוריום שנמדדו ממסלול מטושטשות בגלל טביעת הרגל הרחבה של הגלאי; מפה משוחזרת (deconvolved), שבה הטשטוש הזה מוסר באופן מתמטי, מחדדת אותן לכ-26 ק"מ. ברזולוציה הזאת אפשר להפריד את התעלות מן הטבעות שסביבן.

השאלה. האם התוריום נמוך ביותר בדיוק מעל התעלות של כיפות ההזנה?

מה המודל צופה. המינימום נמצא מעל התעלות, כפי שמאמר 5, J.6§ דורש.

נתונים. מפת התוריום המשוחזרת ברזולוציה של 26 ק"מ.

שיטה. התוריום מעל כל כיפה מול הטבעות שסביבה, ברזולוציה החדה יותר.

היכן בסדרה. מאמר 5, פריט עבודה עתידית 5, J.6§; מאמר 1, F.3§, פריט 8.

33 טבעת השפה של הימות עשירי הנדיפים

המודל קורא את שולי הימות כמבנה שנבנה מן הריסוס של הפתחים שלהם עצמם: חומר שנזרק החוצה בזמן שהפתח היה פעיל, נחת בקרבת מקום והשאיר טבעת של מכתשים קטנים על השפה. מאמר 5 בדק זאת לכל השפות יחד ופסל זאת: לא כל שפה נושאת טבעת כזאת. מה שנשאר הוא הצורה הצרה והחזקה יותר: הטבעת שייכת לימות שהיו העשירים ביותר בנדיפים, משום שהנדיפים הם שהניעו את הריסוס.

השאלה. האם הימות העשירים ביותר בנדיפים נושאים טבעת של מכתשים קטנים על שפותיהם?

מה המודל צופה. לא כל שפה נושאת טבעת (מאמר 5, M.1§). הטבעת שייכת לימות עשירי הנדיפים, שהריסוס שלהם בנה את השוליים (מאמר 5, מאמר 6 (The Craters)).

נתונים. קטלוגים של מכתשים קטנים; מפות של מרבצים פירוקלסטיים ושל מרבצי מעטה כהה (זכוכית געשית דקה שנזרקה החוצה בהתפרצויות שהונעו בגז); מפות הידרציה של Moon Mineralogy Mapper (M³).

שיטה. מכתשים קטנים על השפה הממופה מול הקרקע שמחוצה לה, כשהימות מוסרים משני הצדדים, מול תכולת נדיפים מדודה לכל ים.

היכן בסדרה. מאמר 5, פריט עבודה עתידית 2, F.3, H.2, M.1, M.3§§; מאמר 6, O.1§ ("טבעת הריסוס הפעיל", פתוח).

34 חשיפה הדרגתית בתוך ים אחד

חזית החשיפה נעה על פני הגוף לאורך זמן. ים גדול שהחזית חצתה לא נחשף אפוא בבת אחת: צד אחד היה פתוח בזמן שהצד האחר עדיין היה מכוסה. הצד שנחשף ראשון צריך לשאת רשומה ארוכה יותר: יותר מכתשים, יותר מהם מלאים, ושימור שונה.

השאלה. האם ים גדול שחזית החשיפה חצתה שונה מצד אחד לצד האחר, בכיוון החשיפה?

מה המודל צופה. הים נחשף צד אחר צד לאורך זמן (מאמר 5).

נתונים. שימור המכתשים, מילויים ומבנם לרוחב ימות גדולים.

שיטה. חתכים לרוחב הים לאורך כיוון החשיפה.

היכן בסדרה. מאמר 5, I.3, M.3§§.

35 פתחי פליטה וצינורות: אופי הפתח לפי האזור

המודל ממקם את הפתחים בשלושה אזורים של הגוף שעל האגס: הכתר והאגף של הכיפה העליונה, שנחשפו ופלטו חומר; והאזור שמתחת לבסיס, שנשאר מכוסה ורק הולך דרכו התכה עד השחרור. פתח שפלט ופתח שרק הולך צריכים להיראות שונים היום. המודל קורא את ההבדל במסקונים – אנומליות הכבידה החיוביות החזקות (ריכוזי מסה) שנמצאות מתחת לימות רבים בצד הקרוב: מסקונים עם טבעות בחגורה, מסקונים בלי טבעות במגע, ומעבר להם אגנים על קרום עבה.

השאלה. האם פתחים שפלטו בזמן שהיו חשופים (הכתר והאגף) שונים באופן מדיד מפתחים שרק הוליכו מתחת לכיסוי (מתחת לבסיס)?

מה המודל צופה. בחגורה, מסקונים עם טבעות; במגע, מסקונים בלי טבעות; מעבר לכך, אגנים על קרום עבה (מאמר 3, מאמר 5, מאמר 11 (The Requirements)).

נתונים. שדות של מכתשים משניים; עובי הקרום מתחת לכל אגן; הרכב המילוי המוקדם ביותר; גרדיאנטי הכבידה של GRAIL; מדד גובה של השפה.

שיטה. קבוצות שנקבעות לפני שהטבעות נבחנות; רשימת אגנים מלאה עם מדד גובה; השוואה למודלים של פגיעה, מילוי, שקיעה וחדירה.

היכן בסדרה. מאמר 3, פריט עבודה עתידית 9, B.5§; מאמר 5, D.6, M.3§§; מאמר 11, פריט עבודה עתידית 6, C.3, D.3§§ ("טבעות ופתחים"). קשור: נושא 108 (מבחנים T3, T4).

36 חלק הטיטניום של מחקר 13

מחקר 13 של מאמר 5 שאל אם ההתכה של המגע, שעלתה מעומק רב יותר, דיללה את התוריום ביחס לטיטניום יותר מן ההתכה שמעבר לו. חלק התוריום של המחקר עמד. חלק הטיטניום היה צפוי, אך לא הפריד בין האזורים: Imbrium, היציאה הראשית, אינו מפריד, והמכתש Copernicus H מראה סימן הפוך. המחקר נשאר כתום עד שמפות הטיטניום ייקראו בקנה מידה עדין יותר.

השאלה. האם היחס בין תוריום לטיטניום יורד בתוך המגע יותר מאשר מחוצה לו?

מה המודל צופה. צפוי, אך לא הפריד בין האזורים. Imbrium אינו מפריד; Copernicus H מראה את ההפך. חלק התוריום עמד (מאמר 5).

נתונים. מפות תוריום ו-TiO₂.

שיטה. טיטניום ברזולוציה גבוהה יותר (המצלמה רחבת הזווית של LROC, M³), כשהימות והמישורים מופרדים בתוך כל אזור.

היכן בסדרה. מאמר 5, J.4, M.2§§ (מחקר 13, כתום); מאמר 1, D.1§.

37 הצווארון של הימות הפתוחים בצד הרחוק

אם שולי הים נבנו משכבות של החומר החוזר שלו עצמו, הקרקע שמסביבו צריכה לעמוד מוגבהת, כמו צווארון. מאמר 5 מצא צווארון כזה סביב ימות הצד הרחוק כולם יחד, ובבירור הרב ביותר סביב הימות הקבורים. סביב עשרת הימות הפתוחים של הצד הרחוק לבדם (צווארון חציוני של 207 מ') עדיין לא הוכח שהוא עומד מעל הביקורת.

השאלה. האם הצווארון המוגבה עומד מעל הביקורת סביב הימות הפתוחים של הצד הרחוק לבדם?

מה המודל צופה. השוליים נבנו משכבות של החומר החוזר של הים עצמו. צווארון נמצא סביב ימות הצד הרחוק יחד, ובבירור הרב ביותר סביב הקבורים, אך עדיין לא סביב 10 הימות הפתוחים של הצד הרחוק (חציון 207 מ') (מאמר 5).

נתונים. טופוגרפיה של LOLA ו-SLDEM (מד הגובה הלייזרי של Lunar Reconnaissance Orbiter, ממוזג עם מודל השטח הסטריאוסקופי של Kaguya).

שיטה. חתכים טבעתיים עם ביקורת גדולה יותר או מותאמת טוב יותר.

היכן בסדרה. מאמר 5, F.3, M.2§§ (מחקר 16, כתום); מאמר 1, D.1§.

38 הבורות והמערות של הירח: חללי אדים, לא צינורות לבה

תצלומים ממסלול מראים בורות בעלי דפנות תלולות בפני השטח של הירח, ובשנת 2024 הראו נתוני מכ"ם מעבר של מערה שנפתח מתחת לבור של Mare Tranquillitatis. בספרות, הבורות שבימות הם פתחי תקרה של צינורות לבה: תעלות שנשארו כשפני השטח של זרם לבה קפאו וההתכה שמתחתם התנקזה. ההצעה של המחבר שונה: הבורות והמערות הם חללים שהשאירו אדים לכודים שפרצו החוצה. החומר של המודל היה עשיר במים ובנדיפים אחרים, וכשהפתחים של הצד הרחוק נאטמו, הלחץ שמתחתם נלכד (מאמר 5, I.5§); אדים שנכלאו בקליפה ופילסו את דרכם החוצה משאירים אחריהם חללים. שתי הקריאות נבדלות בצורה ובמקום. צינור לבה הוא צינור ארוך ורדוד שנמשך לאורך הזרם, והוא קיים רק היכן שזרמה לבה. חלל אדים הוא רשת עמוקה ומפוזרת, והוא יכול להימצא בכל מקום שבו נכלאו אדים. הבור של Mare Tranquillitatis נמצא בתוך פי הפתח של הים. המבחן עדיין לא נעשה.

השאלה. האם הבורות והמערות של הירח הם חללים שהשאירו אדים לכודים שפרצו החוצה, ולא צינורות לבה?

מה המודל צופה. חללי אדים: רשתות עמוקות ומפוזרות ולא צינורות ארוכים ורדודים, ולא רק בקרקע שבה זרמה לבה. המקרה המכריע הוא מערה בצד הרחוק, הרחק מכל בזלת: היא לא יכולה להיות צינור לבה, כי לא זרמה שם לבה.

נתונים. הקטלוג של LROC לבורות הירח (Wagner ו-Robinson, 2014, ועדכוניו המאוחרים), עם הסביבה של כל בור; מפת הימות של LROC; תצלומים של דפנות הבורות במצלמה צרת הזווית של LROC (Narrow Angle Camera); מכ"ם Mini-RF, שבעזרתו נמצא המעבר שמתחת לבור של Tranquillitatis (Carrer ועמיתיו, 2024).

שיטה. כל בור ממוין לפי סביבתו ולפי מרחקו מהבזלת הממופה הקרובה ביותר, והבורות של הצד הרחוק שרחוקים מבזלת נרשמים בנפרד. בספרות, הבורות שמחוץ לימות נקראים כקריסות בהתכה המקוררת של מכתשים, ולכן הסביבה לבדה אינה מכריעה; בבורות שיש תצלומים של דפנותיהם או מכ"ם מתחתם נקראת גם צורת החלל: ארוך ורדוד לאורך זרם, או עמוק ומסתעף.

היכן בסדרה. עדיין לא בסדרה; עלה ברשימות העבודה של המחבר (האוסף של 16.10.2026). קשור: מאמר 5, I.5§ (הלחץ שנלכד מתחת לפתחים האטומים של הצד הרחוק); מאמר 8, B6§ (חללים שהשאירו גזים שנמלטו קרוב לפני השטח).

39 קפיצת הקרום מתחת לפתח לפי גיל האגן

מתחת למרכז של פתח הקרום דק יותר מאשר בטבעת שסביבו: כיפת ההזנה נדחפה מלמטה, הרימה את המעטפת הצפופה שמתחת לפתח והדקה את הקרום הקל שמעליו. מאמר 5 קורא להפרש הזה *קפיצת הקרום*, וממד אותו פתח אחר פתח: 29 מתוך 36 הפתחים המסומנים מראים קפיצה של 8 ק"מ ויותר, עם חציון של 17 ק"מ, לעומת 4 מתוך 169 מכתשים רגילים, עם חציון של 1 ק"מ. ההצעה של המחבר מוסיפה למדידה הזאת את הזמן. אגן שנוצר כשהירח עדיין היה חם לא שמר על הקפיצה שלו: החומר החם שמתחתיו זרם לאט בחזרה,

והקפיצה "נרגעה". אגן צעיר שמר יותר ממנה. הספרות קוראת באותו אופן את הכבידה המעומעמת של כמה אגנים עתיקים, כהרפיה צמיגה בירח מוקדם וחם (למשל Kamata ועמיתיו, 2013). שתי הסתייגויות קובעות את צורת המבחן. את האגנים יש לסדר לפי גיל בלי הכיול של ספירות המכתשים לשנים (הכיול של Neukum), שמניח קצב קבוע של גופים מבחוץ, הנחה שהמודל אינו מקבל. ואגן גדול מראה קפיצה גדולה יותר בגלל גודלו בלבד, ולכן יש להחזיק את הגודל קבוע.

השאלה. האם קפיצת הקרום מתחת לפתח, ביחס לגודלו, גדולה יותר באגנים צעירים וקטנה יותר בישנים?

מה המודל צופה. כן. באגן ישן, שנוצר כשהירח היה חם, הקפיצה נרגעה; אגן צעיר שמר יותר ממנה.

נתונים. קפיצות הקרום של מאמר 5, D.2§ (ארבעת המודלים של עובי הקרום מ-GRAIL, בממוצע; המרכז עד 0.3 מהרדיוס מול הטבעת שבין 1.3 ל-2.0 רדיוסים); הסדר היחסי של האגנים לפי חפיפה, כלומר מה מונח על מה (Wilhelms, 1987), ולפי צפיפות המכתשים שמונחים עליהם (Fassett ועמיתיו, 2012).

שיטה. הקפיצה מחולקת ברדיוס, או מושווית בין אגנים בגודל דומה, מול הסדר לפי חפיפה ולפי צפיפות מכתשים, בפתחים שמראים את הקפיצה; מתאם דרגות לכל אחד מן הסידורים. אף סידור אינו מומר לשנים.

היכן בסדרה. מאמר 5, D.2§ (מחקר 3), שמודד את הקפיצה עצמה אך לא את התלות שלה בגיל. התלות בגיל עדיין לא בסדרה; עלתה ברשימות העבודה של המחבר (האוסף של 16.10.2026).

40 קוטר הפתח לפי משך ההזנה

פתח שהזין זמן רב מתחת לכיסוי, בחום ובלחץ, יכול להתרחב יותר מפתח שנחשף והתקרר מוקדם: זרם חם מרחיב את הנוזל שלו, כמו שמים זורמים מרחיבים תעלה בקרח. מאמר 5 מנסח זאת כתחזית ולא כהנחה: הקוטר של פתח הוא פונקציה של היסטוריית ההזנה שלו, של הלחץ, הטמפרטורה, השטף והצמיגות של ההתכה שלו, ושל החשיפה שלו, $D = F(\text{history of feeding}, P, T, Q, \eta)$. הפתחים מתחלקים לשלושה דורות לפי ההיסטוריה הזאת (מאמר 5, I.4§): דור I בצד הרחוק, חשוף מההתחלה ונאטם מוקדם; דור II בחגורה, תחילה פה ואחר כך יציאה; דור III במגע, מכוסה עד סמוך לשחרור. מאמר 5 קרא צד אחד של התחזית בקטלוג שלו: שש כיפות ההזנה הגדולות ביותר, שקוטן 450–909 ק"מ, נמצאות כולן בצד הקרוב, והקוטר החציוני שם הוא 375 ק"מ לעומת 227 ק"מ בצד הרחוק, שבו הגדולה ביותר היא Orientale, 435 ק"מ. הסדר של הקטרים לפי הדור, שהוא המבחן של התחזית עצמה, עדיין לא נעשה.

השאלה. האם הפתחים שהזינו הכי הרבה זמן מתחת לכיסוי רחבים יותר מאלה שנחשפו והתקררו מוקדם?

מה המודל צופה. קוטר הפתח מסודר לפי משך ההזנה שלו (מאמר 5, I.6§): הפתחים שהזינו הכי הרבה זמן מתחת לכיסוי הם הרחבים ביותר.

נתונים. הקטרים, האזורים והדורות של כיפות ההזנה והימות בנספח A של מאמר 5; שדה הכבידה של GRAIL, שממנו נמדדו הכיפות; המרחק של כל פתח ממרכז המגע, שקובע מתי הוא נחשף (מאמר 5, I.1§).

שיטה. הקוטר מול הדור ומול המרחק ממרכז המגע, גם בתוך הצד הקרוב וגם על פני שני הצדדים, כדי שהשוואה לא תישען רק על ההבדל בין חצאי הכדור; כיפות קבורות וכיפות פתוחות נמדדות באותו אופן, ככיפות.

היכן בסדרה. מאמר 5, I.4, I.6§§ ("גודל הפתח כזיכרון"). קשור: נושא 30 (המנוע של הפתחים).

41 השפה של ים כרישום שכבות: גובה השפה ומשך הפליטה

בספרות, הקרקע הגבוהה שסביב אגן היא השפה שלו, שהורמה באירוע אחד: המכה שחפרה את האגן והקריסה שבאה אחריה. במודל, השוליים של ים נבנו מבחוץ, שכבה על שכבה, מהחומר שהים עצמו זרק החוצה (מאמר

5, F.3§). חומר שנפל חזרה לתוך הים נעלם בו; חומר שנפל על השוליים נשאר שם והשאיר סימן של זמנו. מכאן נובעות שתי תוצאות. ככל שפתח זרק חומר זמן רב יותר, השוליים שלו צריכים לעמוד גבוה יותר. ושוליים שנבנו כך הם שכבתיים, וגיליהם מתפרסים על פני זמן הפליטה, ואילו לשפה של קריסה אחת יש גיל אחד. מאמר 5 מדד שכל רצפה גדולה נמצאת מתחת לשפה שלה (16 מתוך 16, בחציון של 3.4 ק"מ), ומצא צווארון מוגבה של חומר חוזר סביב הימות הרחוקים (נושא 37). האם גובה השפה הולך לפי משך הפליטה, והאם השפות בנויות שכבות, עדיין לא נבדק.

השאלה. האם השפות של הימות בנויות שכבות שגיליהן מתפרסים על פני זמן, והאם גובה השפה גדל עם משך הזמן שבו הים זרק חומר החוצה?

מה המודל צופה. ככל שהשפה גבוהה יותר, הפליטה נמשכה זמן רב יותר. השפה שכבתית, עם פיזור של גילים; לשפה שנוצרה בקריסה אחת אחרי פגיעה היה גיל אחד.

נתונים. גובהי השפות מ-LOLA ומ-SLDEM2015, שנקראים כמו במחקר 6 של מאמר 5; גילים מספירת מכתשים של היחידות שעל כל שפה; תצלומים במצלמה צרת הזווית של LROC (Narrow Angle Camera) וספקטרה של Moon Mineralogy Mapper (M³) של הדפנות של גושי השפה; סדר החשיפה והדור של כל פתח (מאמר 5, I.1, I.4§§).

שיטה. גובה השפה מעל הרצפה ומעל הקרקע שמסביב, מול משך הזמן שבו כל פתח זרק חומר: לפי סדר החשיפה, ולפי זמני האטימה כשנושא 30 יספק אותם. על השפות, חיפוש אחר שכבות בדפנות הגושים ואחר פיזור של גילים בין היחידות של שפה אחת.

היכן בסדרה. מאמר 5, F.3§ (השוליים שנבנו משכבות של חומר חוזר; מחקר 16), F.1§ (הרצפה מתחת לשפה). קשור: נושאים 33 (טבעת השפה) ו-37 (הצווארון).

42 קהה או חדה: הפסגה במקום שבו השפה של מכתש גדול חסרה בצד המישור

במישורי המגע, המכתשים הגדולים איבדו את השפות שלהם בצד שפונה אל המישור. הספרות קוראת שפה נמוכה על מישור של ים כהצפה: בזלת עלתה סביב המכתש והסתירה את המדרונות התחתונים שלו, כמו מים שעולים סביב ארמון חול ומסתירים את בסיסו אבל משאירים את ראשו שלם. המודל קורא זאת כחום: מישור המגע, שחומם מכדור הארץ שמתחתיו, שחק את השפה במקום שבו נגע בה, והנמיך את הפסגה עצמה. שתי הקריאות נפרדות בפסגה. הצפה עולה לאורך המדרון החיצוני ואינה מגיעה לראש, ולכן פסגה שהוצפה נשארה חדה; פסגה שנשחקה בחום היא קהה. מאמר 5 ומאמר 6 מדדו זאת (מחקר 15). במישורי המגע, השפה חסרה ב-24% יותר מן הכיוונים שפונים אל המישור מאשר מן הכיוונים שפונים אל הרמה, והפסגה ששרדה בצד המישור קהה יותר: החדות שלה נמוכה ב-35 מ"קמ"ר, הרחוב שלה 50 מ' מתחת לראש גדול ב-0.14 ק"מ, והזווית שלה רחבה ב-5.3°. במישורים שמעבר למגע שני הצדדים כמעט אינם נבדלים. מה שנשאר פתוח הוא ההשוואה הישירה: בהתאמה של מכתש מול מכתש, באותו קוטר, באותו קו רוחב ובאותו עומק פנימי, אפשר היה ליצור רק ארבעה זוגות של המגע ושל מה שמעבר לו, מעט מדי כדי להשוות בין שתי הקבוצות.

השאלה. במדגם מותאם של מכתשים בעלי עומק פנימי שווה, האם הפסגות במישורי המגע קהות יותר מאשר במישורים שמעבר לו?

מה המודל צופה. פסגות קהות במישורי המגע, שם המישור היה חם; פסגות חדות מעבר לו, שם פעלה רק ההצפה (מאמר 5, M.3§).

נתונים. SLDEM2015 ברזולוציה של 512 פיקסלים למעלה (60 מ'); במקומות שבהם הם קיימים, מודלי השטח המדויקים יותר שנבנו מצמדי תצלומים סטריאוסקופיים של המצלמה צרת הזווית של LROC (Narrow Angle Camera); קטלוג המכתשים של Wu ו-Wang; מפת הימות של LROC.

שיטה. הפסגה של כל מכתש נקראת על פרופילים רדיאליים לפי החדות (העקמומיות בראש), הרוחב 50 מ' מתחת לראש והזווית בין המדרון הפנימי לחיצוני, כמו במחקר 15, על מדגם גדול יותר שמותאם מכתש מול מכתש בקוטר, בקו הרוחב ובעומק הפנימי, בין מישורי המגע למישורים שמעבר לו, על מודל הגבהים המדויק ביותר.

היכן בסדרה. מאמר 5, G.6, M.3§§ (מחקר 15); מאמר 6, E.6§ (מחקר 15, "כיווני מחקר נוספים").

43 סימני הכבידה של המכתשים שנעלמו בתוך הימות הפעילים

על הרצפות של ימות המגע, 703,000 קמ"ר, לא נשאר אף מכתש של 20 ק"מ ויותר, לא מומס ולא חד (מאמר 6, D.2§). במודל, המכתשים שנחתו שם בזמן שהימות היו פעילים נכנסו לתוכם ונעלמו; הם אינם באף קטלוג. הם שונים מן המכתשים המומסים שנראים כטבעות על רצפות של ימות אחרים, שמתחתם מצא מאמר 6 עודף מסה קטן בלי קצה (מחקר 14). האם המכתשים שנעלמו השאירו סימן כלשהו בשדה הכבידה, עדיין לא נבדק. הציפייה של המחבר ברורה: אין מתחתם גוף, אלא אם הקצה של המכתש עדיין מבצבץ מעל פני הקרקע, וזה מקרה אחר. אם נשארה מסה כלשהי, היא של החומר החוזר שנחת, נעלם בתוך הים והשאיר שם את המסה שלו, בלי צורה של גוף. הספרות קוראת מבנים טבעתיים בשדה הכבידה מתחת לימות של הצד הקרוב כמכתשים שנקברו תחת בזלת מאוחרת (Evans ועמיתיו, 2016); לפי הקריאה הזאת, מכתש מתחת לים הוא גוף בצורת המכתש, ולגוף בעל צורה יש קצה.

השאלה. האם המכתשים שנעלמו בתוך ימות המגע הפעילים השאירו סימן בשדה הכבידה?

מה המודל צופה. אין גוף בצורת מכתש מתחת לרצפות של ימות המגע: אין טבעת של כבידה תלולה בקצה של מכתש, אלא במקום שבו הקצה של המכתש עדיין מבצבץ מעל פני הקרקע. לכל היותר עודף מסה בלי צורה, כמו מתחת למכתשים המומסים (מאמר 6, D.3§).

נתונים. מודל הקרום של GRAIL ושדה כבידת בוגה (Bouguer) שלו, כלומר הכבידה אחרי שמסירים ממנה את המשיכה של הטופוגרפיה הנראית, ושדות כבידה ממעלה גבוהה יותר; 34 הימות והליבות של כיפות ההזנה שלהם (נספח A של מאמר 5); המכתשים הקבורים שזוהו בשדה של GRAIL על ידי Evans ועמיתיו (2016).

שיטה. חיפוש על הרצפות של ימות המגע אחר טבעות בגודל של מכתשים בשדה כבידת בוגה ובגרדיאנטים שלו, מול נקודות אקראיות על אותן רצפות, כך שהכיפה שמתחת מוסרת, כמו במחקר 14; הטבעות של Evans ועמיתיו ממוינות לפי אזור ונבדקות לקצה, כלומר לתלילות הכבידה בקצה לעומת פנים הטבעת והחוץ שלה.

היכן בסדרה. מאמר 6, D.2§ (אין מכתש של 20 ק"מ ויותר על הרצפות של ימות המגע), D.3§ (מחקר 14, המסה מתחת למכתשים המומסים, בלי קצה).

חלק E — המכתשים ומקורם

המכתשים של המודל נוצרו מחומר חוזר: חומר שנזרק מן הפתחים של כדור הארץ ושל הגוף עצמו, ונחת על הקליפה במהירות דומה לזו שבה עזב (מאמר 6). בקריאה הזאת, כ-99% ממכתשי הירח עשויים חומר ארצי שחזר, והמסה הזרה שגופים חיצוניים היו משאירים אינה נמצאת בקרום. חלק זה אוסף את הנושאים שיהפכו את הקריאה הזאת לשרשרת מחושבת — ממהירות היציאה בפתח, דרך המעבר באטמוספרת האדים וההלם בנחיתה, ועד התפלגות הגדלים של המכתשים ששרדו — ואת הנושאים שקוראים את המקור במכתשים עצמם: בהתכה שלהם, בברזל שלהם ובפיזורם בקווי האורך. שני נושאים נוספים בודקים את השעון ואת פני השטח של המכתשים: האם גילי ספירת המכתשים מבוגרים מגילים ישירים של אותו משטח, והאם הקרניים של המכתשים הצעירים נמצאות בתוך פני השטח ולא מעליהם. זה אחד משני המקומות שבהם אפשר להכריע את המודל (חלק K): האם החומר שבתוך המכתשים זר או חוזר.

מס'	נושא	מוכנות
44	מהירות היציאה מהפתחים	מידול חדש
45	המעבר דרך אטמוספרת האדים	מידול חדש
46	הלם במטרה חמה ושכבתית; חוק קנה המידה ב- $g = 8.25 \text{ m/s}^2$	מידול חדש
47	המגמה בסדרת אירועים	נתונים חדשים
48	התפלגות גודלי המכתשים, מחושבת מן המקור	מידול חדש
49	לראות את הגוף החוזר, לא את הקרקע	נתונים חדשים
50	חומר נפלט שנלכד אחרי השחרור	מידול חדש
51	רשומת קווי האורך: עוצמת הנחיתה או הימות?	נתונים ציבוריים
52	העודף בצד המאסף: תפוקת המכתשים ליד 90° מזרח	מידול חדש
53	כדור הארץ כמפזר האחרון	נתונים ציבוריים
54	חומר שאחרי השחרור עני יותר בברזל	נתונים ציבוריים
55	ברזל ברצפות הגבוהות והנמוכות	נתונים ציבוריים
56	גילי ספירת מכתשים מול גילים ישירים	נתונים ציבוריים
57	הקרניים של המכתשים הצעירים: חומר בתוך פני השטח	נתונים ציבוריים

הצבעים עוקבים אחר השרשרת. הפיזיקה של המעוף (44–48, 50, 52) דורשת חישובים חדשים; הקריאה של המכתשים עצמם (51, 53–57) יכולה להתחיל כבר עכשיו על מפות ציבוריות; שני הנושאים בכחול דורשים מדידות על חומר שבידינו.

44 מהירות היציאה מהפתחים

מאמר 6 שואב את אנרגיית הפליטה מן הנדיפים: מים ופחמן דו-חמצני המומסים בהתכה בעומק יוצאים מן התמיסה כשהלחץ יורד, והגז דוחף את ההתכה החוצה מן הפתח. מאמר 6 מראה היכן החומר נחת, אך אינו מוכיח את המהירות. כדי שהמכתשים ייווצרו כפי שהמודל קורא אותם, החומר החוזר צריך לנחות במהירות של 2–8 ק"מ/ש', ולכן הפתחים היו צריכים לזרוק אותו במהירות דומה.

השאלה. האם פריקת לחץ נפיצה של התכה עשירה בנדיפים, בלחצי המקור של מאמר 3, נותנת מהירויות יציאה שבהן החומר חוזר במהירות של 2–8 ק"מ/ש'?

מה המודל צופה. אנרגיית הפליטה באה מן הנדיפים. מהירות החומר החוזר היא דרישה, שאינה מוכחת במאמר 6 (מאמר 6, מאמר 11).

נתונים. תכולות הנדיפים (דרישה R6); לחצי המקור (מאמר 3).

שיטה. מודל של פריקת לחץ נפיצה שנותן את התפלגות מהירויות היציאה.

היכן בסדרה. מאמר 6, פריט עבודה עתידית 2, J.1, O.1§§ (השורה "פליטה, מעבר ונחיתה מהירה"); מאמר 11, D.1§ (השורה של מאמר 6).

45 המעבר דרך אטמוספרת האדים

בדרכו חזרה, החומר שנזרק היה צריך לחצות את אטמוספרת האדים הצפופה של התרחיש, שלחץ הבסיס שלה בסדר גודל של 10 עד 1,000 בר. גוף קטן או מפוזר היה מואט ומתפרק בה; גוף מרוכז יכול לעבור דרכה ולפגוש את הקליפה. מאמר 6 נותן דוגמה אחת בלבד: גוף שקוטרו קילומטר אחד, שחוצה עמוד שבבסיסו 100 בר, שומר על כמחצית ממהירותו. טווח הגדלים שמגיעים שלמים, כשהימיוסם וההתפרקות נכללים, עדיין לא חושב.

השאלה. אילו גופים חוזרים בגודל 0.1–10 ק"מ מגיעים שלמים אל הקליפה דרך אטמוספרה של 10–1,000 בר?

מה המודל צופה. גוף חוזר מרוכז עובר ופוגש את הקליפה (מאמר 6).

נתונים. אין צורך בנתונים; זהו חישוב.

שיטה. מסלולים מצומדים של כבידה וגרר, עם חימום והתפרקות.

היכן בסדרה. מאמר 6, פריט עבודה עתידית 3, J.3§.

46 הלם במטרה חמה ושכבתית, וחוק קנה המידה של מכתשים ב- $g = 8.25 \text{ m/s}^2$

לחץ ההלם שמושג כשגוף נוחת תלוי בשני החומרים, דרך עקומות Hugoniot שלהם (הקשר הנמדד בין לחץ ההלם לדחיסה בכל חומר). מאמר 6 העריך אותו כבזלת שנוחתת על בזלת. המטרה של המודל שונה: קליפה סיאלית קרה (השכבה החיצונית הקלה, העשירה בצורן ובאלומיניום) מעל בסיס חם ונייד, על גוף שכבידת פני השטח שלו בשלב ההוא הייתה 8.25 מ"ש², כפי חמישה מכבידת הירח היום. גם ההלם וגם גודל המכתש שהוא יוצר צריכים להיות מחושבים מחדש עבור המטרה הזאת.

השאלה. איזה לחץ הלם ואיזה גודל מכתש יוצר גוף חוזר צפוף על קליפה סיאלית קרה מעל בסיס נייד?

מה המודל צופה. החישוב הזה מחליף את ההערכה של בזלת על בזלת שבמאמר 6.

נתונים. נתוני Hugoniot לסיאל ולבזלת.

שיטה. התאמת עכבות (impedance matching — פתרון הלחץ ומהירות החלקיק המשותפים במגע בין שני החומרים) וחוקי קנה מידה של מכתשים עבור הכבידה של הקליפה.

היכן בסדרה. מאמר 6, פריט עבודה עתידית 4, J.2§.

47 המגמה בסדרת אירועים

מאמר 6, משוואה (14), קושר את ההלם בגוף חוזר לגובה המטרה על הגוף. המגמה שהיא צופה תלויה במסלול: במקור החומר, בסיבוב ובשדה באותו זמן. המודל אינו צופה מגמה כללית אחת לכל האירועים; ההשוואה נעשית בתוך סדרת אירועים שחולקים מקור, סיבוב ושדה אחד.

השאלה. האם מדדי ההלם משתנים עם גובה המטרה כפי שמשוואה (14) צופה, עבור מקור, סיבוב ושדה מוצהרים אחד?

מה המודל צופה. המגמה מותנית במסלול, כפי שנוסח במאמר 6, והיא נקראת בתוך סדרת אירועים בעלי מקור, סיבוב ושדה אחד.

נתונים. מדידות הלם ביחידות שגילן ומוצאן מזהים.

שיטה. בקרה על החומר, הזווית והמיקום בתוך אירוע.

היכן בסדרה. מאמר 6, O.1§§ (שורה 2), K.3.

48 התפלגות גודלי המכתשים, מחושבת מן המקור

התפלגות הגודל-שכיחות של מכתשים — מספר המכתשים ליחידת שטח כפונקציה של קוטרם — היא טביעת האצבע המקובלת של אוכלוסיית מכתשים. במודל היא צריכה לנבוע מן הגדלים והמהירויות שבהם החומר עזב את הפתחים, אחרי התפרקות במעוף, נחיתה, רוויה (המצב שבו מכתשים חדשים מוחקים ישנים באותו קצב שבו הם נוצרים) וקבורה תחת מילוי מאוחר. מאמר 6 שומר את ההתפלגות כאילוץ על המודל, ועדיין לא כמבחן שהוא עבר או נכשל בו.

השאלה. איזו התפלגות גודל-שכיחות נובעת מן הגדלים והמהירויות של הפליטה, אחרי התפרקות, נחיתה, רוויה וקבורה?

מה המודל צופה. בינתיים אילוץ, לא מבחן שנכשל (מאמר 6).

נתונים. קטלוגי מכתשים (Wu-i Wang ;Kadish-i Head ;Robbins).

שיטה. מודל קדמי מן המקור ועד המכתשים ששרדו, שאינו מניח לא רוויה ולא שטף קבוע.

היכן בסדרה. מאמר 6, P.2§.

49 לראות את הגוף החוזר, לא את הקרקע

נושא זה הוא אחת משתי תצפיות המפתח של המודל בחלק K. מאמר 5 מצא שהקרקע שסביב ים נושאת את הברזל של הים: FeO יורד מ-6.9 ל-3.1 אחוזי משקל בתוך 150 ק"מ מן הים, לעומת 2.3 אחוזי משקל בביקורת. ובכל זאת, מכתש שנוצר מן החומר הזה נראה כמו סביבתו, משום שהנחיתה השליכה הצידה את הציפוי הדק וחשפה את הקרקע שמתחתיו. החתימה של הגוף החוזר אינה נמצאת אפוא על פני השטח שסביב המכתש; יש לקרוא אותה בהתכה שנוצרה בנחיתה, שמערבת את הגוף הנוחת עם המטרה.

השאלה. האם אפשר לזהות את חלקו של החומר החוזר בתוך מכתש, והאם הוא נושא את חתימת הברזל והתוריום של הים שהיה מקורו?

מה המודל צופה. הקרקע שסביב ים נושאת את הברזל של הים (FeO יורד מ-6.9 ל-3.1 אחוזי משקל בתוך 150 ק"מ; ביקורת 2.3), אך המכתש נראה כמו סביבתו משום שהנחיתה השליכה את הציפוי הצידה. החתימה של

הגוף החוזר נישאת בהתכה (מאמר 5, מאמר 6).

נתונים. מרבצי התכה וזכוכית בתוך מכתשים; תורים משוחזר; דגימות עתידיות.

שיטה. פנים המכתשים נקרא אזור אחר אזור; הרכבי ההתכה והזכוכית מול הים המועמד כמקור; מודל ערבוב של הגוף החוזר והמטרה.

היכן בסדרה. מאמר 6, L.2, L.3, O.1§§ (השורות "מקור ארצי" ו"הימות כמקור"); מאמר 5, C.7–C.8§§. קשור: נושא 109.

50 חומר נפלט שנלכד אחרי השחרור

כדור הארץ לא חדל לזרוק חומר כשהירח שוחרר. ירח שנמצא במרחק של רדיוסי ארץ ספורים בלבד היה לוכד חלק מן החומר הנפלט המאוחר הזה, והנחיתות האלה יוצרות אוכלוסייה נפרדת: המכתשים הצעירים המעטים שעל הימות. גודל החלק שנלכד תלוי במהירות השיגור ובכיוונו, ועדיין לא חושב.

השאלה. איזה חלק מן החומר שכדור הארץ פלט אחרי השחרור לכד ירח שנמצא במרחק של רדיוסי ארץ ספורים, כפונקציה של מהירות השיגור וכיוונו?

מה המודל צופה. כדור הארץ המשיך לזרוק אחרי השחרור; חלק מן החומר הגיע לירח (מאמר 3, מאמר 6).

נתונים. המכתשים הצעירים המעטים שעל הימות; רשומת ההלם והגודל שלהם.

שיטה. חישוב לכידה מסלולית, יחד עם הרשומה שמפרידה את האוכלוסייה הזאת מגופים מאוחרים יותר שהגיעו מבחוץ.

היכן בסדרה. מאמר 6, פריט עבודה עתידית 1, M.1§; מאמר 3, C.11§.

51 רשומת קווי האורך: עוצמת הנחיתה או הימות?

החומר שהגוף עצמו פלט נחת לכיוון החצי המאסף שלו (90° מזרח) ופגש את החצי המוביל שלו (90° מערב) חזיתית, ולכן הנחיתות על החצי המוביל היו קשות ואלה שעל החצי המאסף רכות (מאמר 6). מאמר 6 מוצא ששפות משוננות (בלתי סדירות) שכיחות פי 1.14–1.25 ב- 90° מערב, אך חלק מן הרווחים של השפות הגדולות יותר כוללים את האפס, וחלק מן ההבדל עשוי לבוא מן הימות, שאינם מפוזרים באופן שווה בין שני החצאים.

השאלה. כמה מן ההבדל בין 90° מערב ל- 90° מזרח בשפות, בהרים המרכזיים וברצפות הוא עוצמת הנחיתה, וכמה הוא הימות?

מה המודל צופה. נחיתה קשה על החצי המוביל (90° מערב) ורכה על החצי המאסף (90° מזרח). שפות משוננות שכיחות פי 1.14–1.25 ב- 90° מערב, אך חלק מן הרווחים של השפות הגדולות יותר כוללים את האפס (מאמר 6).

נתונים. ארבע הכיפות של מאמר 6, N.1§; קטלוג זרמי ההתכה של הירח (Neish ועמיתיו).

שיטה. ביקורת ידנית של ההרים המרכזיים והשפות; צירוף עם קטלוג זרמי ההתכה; אותם מדדים לפי גיל המכתש.

היכן בסדרה. מאמר 6, פריט עבודה עתידית 5, I.1§, F.1, מחקר 6 (כתום); מאמר 1, D.1§.

52 העודף בצד המאסף: תפוקת המכתשים מן הפתחים שליד 90° מזרח

בחצי המאסף של הירח יש יותר מכתשים גדולים מאשר בחצי המוביל: פי 1.96 לפני מיסוך הימות, ופי 1.45 אחריו. המודל מייחס את העודף לחומר שהגוף עצמו פלט, שנחת לכיוון החצי המאסף, ולמספר הגדול יותר של

פתחים ליד 90° מזרח. הקשר בין הפתחים לעודף הוא דרישה; מספר המכתשים שיצרו הפתחים שליד 90° מזרח עדיין לא חושב.

השאלה. האם הפתחים הרבים יותר שליד 90° מזרח יצרו די מכתשים של $20 \geq$ ק"מ כדי להסביר את העודף בצד המאסף (פי 1.96 גולמי, פי 1.45 ממוסך)?

מה המודל צופה. החומר שהגוף עצמו פלט נוחת לכיוון החצי המאסף. הקשר הוא דרישה, עדיין לא תוצאה (מאמר 6, מאמר 7 (The Poles)).

נתונים. צפיפות המכתשים כפונקציה של המרחק מכל ים.

שיטה. היסטוריית הפליטה של כל פתח, מועברת דרך המעופים של מאמר 6 עד תפוקת נחיתה.

היכן בסדרה. מאמר 7, פריט עבודה עתידית 9, E.2, A.9§§; מאמר 6, K.4§; מאמר 1, F.2§, טבלת החישובים הפתוחים ("תפוקת המכתשים מן הפתחים שסביב 90° מזרח").

53 כדור הארץ כמפזר האחרון

המכתשים הקטנים האחרונים על רצפות הימות החלקות רבים יותר בצד הקרוב, פי 1.12–1.27, כשהמכתשים המשניים (מכתשים שנוצרו מגושים שנזרקו ממכתש גדול יותר) מוסרים (מאמר 5, מחקר 9, ירוק). המודל קורא זאת כחומר מכדור הארץ, המפזר האחרון שפונה אל הצד הקרוב. הצעד הפתוח הוא לספור את המכתשים האלה לפי המרחק מכל מקור מועמד, כך שעודף בצד הקרוב שנשאר אחרי שהמרחק מוחזק קבוע יוכל להיות מיוחס לכדור הארץ.

השאלה. האם המכתשים הקטנים האחרונים על הרצפות החלקות מתרבים ככל שמתרחקים מן המגע, ונשאר עודף בצד הקרוב כשהעלייה הזאת מוחזקת קבועה?

מה המודל צופה. העודף בצד הקרוב של המכתשים הקטנים האחרונים הוא פי 1.12–1.27 כשהמשניים מוסרים (מחקר 9, ירוק). המבחן הפתוח הוא ספירה לפי המרחק מכל מקור מועמד (מאמר 5, מאמר 6).

נתונים. מכתשים טריים של 1–2 ק"מ; מסכות של קרניים ושל שדות משניים.

שיטה. ספירות על הרצפות לפי המרחק מכל מקור מועמד.

היכן בסדרה. מאמר 5, פריט עבודה עתידית 3, F.6, M.3§§; מאמר 6, L.7, O.1§§.

54 חומר שאחרי השחרור עני יותר בברזל

אחרי השחרור, החומר הכבד שקע בחזרה במורד האגס לעבר כדור הארץ והקל עלה (מאמר 3, C.10§); זרימה החוצה המונעת בגז מניעה את החלקים הקלים והקטנים מהר מכולם, וכדי להגיע לירח חומר היה צריך לעזוב את כדור הארץ במהירות של 8.8 ק"מ/ש' או יותר. מה שהגיע לירח היה אפוא החלק הקל יותר. מכתש שנוצר על ים מחומר כזה צריך אם כן לזרוק חומר נפלט עני יותר בברזל מן הבזלת שסביבו. בין המכתשים שבתוך הבזלת, התוצאה הנוכחית נשארת בתוך הפיזור של המפות, ויש להחזיק קבוע את עומק החפירה, שמעלה שכבות שונות.

השאלה. האם החומר הנפלט ממכתשים שנוצרו על הימות אחרי השחרור עני יותר בברזל מן הים שסביבם, כשעומק החפירה מבוקר?

מה המודל צופה. מה שהגיע לירח מכדור הארץ אחרי השחרור היה החלק הקל יותר. בין המכתשים שבתוך הבזלת, התוצאה נשארת בתוך הפיזור של המפות (מאמר 6).

נתונים. מפות FeO ברזולוציה גבוהה יותר.

שיטה. החומר הנפלט מול הים שמסביב, לפי גודל המכתש ועומק החפירה.

היכן בסדרה. מאמר 6, O.1§§, L.6, מחקר 12 (כתום); מאמר 1, D.1§.

55 ברזל ברצפות הגבוהות והנמוכות

חלק מרצפות המכתשים שעל הימות קפאו גבוה, ואחרות שקעו בחזרה. במודל, רצפה שקפאה גבוה החזיקה את הנדיפים שלה ואת החומר הקל יותר, וצריכה להיות עניה יותר בברזל מרצפה ששקעה. מאמר 6 מוצא שהרצפות הנמוכות עשירות יותר, אך כשמודדים מול הבזלת שממש מחוץ לכל מכתש, ההבדל (-0.44 – לעומת -0.64 – אחוזי משקל FeO) אינו חורג מן המקרה.

השאלה. האם רצפות שקפאו גבוה עניות יותר בברזל מרצפות ששקעו בחזרה?

מה המודל צופה. רצפות גבוהות החזיקו את הנדיפים שלהן ואת החומר הקל יותר. רצפות נמוכות עשירות יותר, אך מול הבזלת שממש מבחוץ ההבדל (-0.44 – לעומת -0.64 – אחוזי משקל) אינו חורג מן המקרה (מאמר 6).

נתונים. מפות FeO; גובהי הרצפות ביחס לבזלת שמבחוץ.

שיטה. מדגם גדול יותר או ברזלוציה גבוהה יותר.

היכן בסדרה. מאמר 6, O.1§§, G.3, מחקר 11 (כתום); מאמר 1, D.1§.

56 גילי ספירת מכתשים מול גילי ישירים של אותו משטח

בספרות, גיל של משטח נקרא ממספר המכתשים שעליו, והספירה מומרת לשנים בעקומת כיול (הכרונולוגיה של Neukum ועמיתיו) שמניחה גשם ידוע וקבוע של גופים מבחוץ, המעוגן בדגימות שהביאו Apollo ו-Luna. מאמר 6 מחליף את הגשם הזה: לפי המודל, כמעט כל המכתשים נוצרו מחומר חוזר, שקצב הגעתו עלה וירד עם פעילות הפתחים ופעילות כדור הארץ. ספירת מכתשים מודדת אפוא כמה משטח קיבל, ולא כמה זמן עמד חשוף (מאמר 6); במקום שבו המשטח קיבל יותר מכפי שגשם מבחוץ היה נותן לו באותו זמן, ספירה שמומרת בעקומת הכיול קוראת אותו כמבוגר מכפי שהוא. במקום שבו אותו משטח תוארך בשתי הדרכים – לפי המכתשים שלו מהמסלול, וישירות, לפי הדעיכה הרדיואקטיבית בדגימה שהוחזרה – הגיל הישיר צריך לצאת צעיר יותר, ובאופן שיטתי. Chang'e-6 נתנה עד עכשיו זוג אחד כזה: ספירות מכתשים של $2.98 - 1.54$ מיליארד שנים לים המערבי באתר הנחיתה, וגיל מעבדה של 2.807 ± 0.003 מיליארד שנים לכ-99% משברי הבזלת (מאמר 8, B15, B9). זוג אחד, שנמצא בתוך הטווח של הספירה, אינו יכול להראות מגמה; ההשוואה על פני משטחים רבים עדיין לא נעשתה.

השאלה. במקום שבו אותו משטח תוארך גם בספירת מכתשים וגם ישירות, האם הגיל הישיר צעיר באופן שיטתי מגיל הספירה?

מה המודל צופה. כן. המכתשים באו ברובם מחומר חוזר, בקצב שלא היה קבוע, ולכן ספירה שמומרת לשנים בשטף קבוע מגזימה בזמן החשיפה (מאמר 6, חלק M). גיל ישיר שצעיר מגיל הספירה תומך במודל. המודל קורא גיל ישיר כזמן שבו החומר התקרר ונסגר, כלומר כגיל פני השטח, ולא כגיל הפתח שמתחתיו (מאמר 5, K.1§).

נתונים. גילי ספירת מכתשים וגילי רדיומטריים שפורסמו לאותן יחידות: אתרי Apollo ו-Chang'e-5, Luna (כ-2.0 מיליארד שנים) ו-Chang'e-6 (מאמר 5, K.1§; מאמר 8, B9).

שיטה. להצמיד כל דגימה מתוארכת לגיל הספירה של היחידה שממנה באה, כשהספירה נעשית על היחידה הזו בלבד. מאחר שעקומת הכיול מעוגנת בגילי Apollo ו-Luna, האתרים האלה מתאימים לה מעצם בנייתה; המבחן נשען על משטחים שמחוץ לקבוצת הכיול, ועל ספירות שפורסמו לפני שהדגימה תוארכה. השעונים היחסיים של

הסדרה — מה מונח על מה, וצפיפות המכתשים בהשוואה בין משטחים — נשארים כפי שהם; נבדקת רק ההמרה לשנים.

היכן בסדרה. מאמר 6, חלק M (תיארוך), והשורה "הגילים" בטבלת ההשוואה שבפתח המאמר; מאמר 5, K.1–K.2§§; מאמר 8, B9 (טבלת הגילים) ו-B15. קשור: נושאים 29 (סדר הסגירה) ו-48 (התפלגות גודלי המכתשים).

57 הקרניים של המכתשים הצעירים: חומר בתוך פני השטח

הקרניים הן הפסים הבהירים שיוצאים מכמה מכתשים צעירים, לפעמים למרחק של מאות קילומטרים. בקריאה המקובלת הן חומר פליטה: חומר שהמכתש זרק ושהונח על פני הקרקע סביבו. ההצעה של המחבר קוראת אותן אחרת: קרן היא תיעוד בתוך הקרקע שמתחת לפני השטח, ולא חומר פליטה שמונח עליה — חומר שפגש משטח קר וזכוכיתי וקפא לתוכו. קרן נוצרת רק במקום שבו החומר נחת על קרקעית שכבר התקררה; על קרקעית שעדיין חמה לא נוצרת קרן. כך בקרקעיות הימות, וכך גם במישורי הבזלת של הצד הקרוב — Oceanus Procellarum והמישורים שסביבו, שבהם נמצאים Aristarchus, Copernicus, Kepler — שבחשיפתם לחום הגדול של כדור הארץ הקרוב דומים מאוד לקרקעיות הימות. Aristarchus, Copernicus, Kepler נחתו אחרי שהקרקעית שלהם התקררה, והם נושאים קרניים. Delisle ו-Diophantus נחתו כשהקרקעית עוד לא קפאה עד הסוף, ואין להם קרניים. על הקרקעיות האלה קרן היא אפוא סימן של זמן: מכתש עם קרניים נחת על קרקעית שכבר הייתה קרה, מכתש בלי קרניים — על קרקעית שעוד הייתה חמימה.

ההצעה נבדלת מן הקריאה המקובלת בשלושה דברים שאפשר לראות. הראשון הוא העומק: שכבה שהונחה מלמעלה היא דקה, ומכתשים קטנים וטריים בתוך הקרן היו חודרים דרכה אל הקרקע הכהה שמתחתיה, ואילו קרן שקפאה בתוך הקרקע נמשכת כלפי מטה. Tycho, מכתש קרניים גדול ברמות הדרומיות, הוא מקרה הבדיקה: הקרניים שלו חוצות קרקע של רמות ומגיעות גם אל הימות. השני הוא מצב הקרקעית: בקרקעיות הימות ובמישורי הבזלת, מכתשים עם קרניים ומכתשים בלי קרניים באותו גודל צריכים להיבדל זה מזה בשאלה אם הקרקעית כבר התקררה כשהחומר נחת. מכתשי קרניים כשלעצמם אינם מוגבלים לצד הקרוב: מאמר 7 (D.3§) מצא ש-61 מכתשי הקרניים של Grier ועמיתיו צפופים בצד הרחוק בערך כמו בצד הקרוב (2.01 מול 1.70), ולכן המבחן צריך לבדוק את הקרניים עצמן — היכן הפסים נראים, על איזו קרקעית ועד כמה הם מגיעים — ולא רק את המכתשים שנושאים אותן. השלישי הוא המספר: בין המכתשים הקטנים והבינוניים של הצד הקרוב, אלה שבלי קרניים צריכים להיות רבים מאלה שעם קרניים. הסיבה היא סדר האירועים: הקרקעיות התקררו בזמן שהירח התרחק, וככל שהתרחק הגיע אליו פחות חומר, ולכן פחות מכתשים נחתו על קרקעיות שהתקררו מאשר על קרקעיות חמימות. אף אחת משתי הקריאות עוד לא נבדקה במונחים האלה.

השאלה. האם הקרניים של המכתשים הצעירים הן תיעוד שקפא בתוך הקרקע, ולא חומר פליטה שמונח עליה, והאם הן נוצרות רק במקום שבו החומר נחת על קרקעית שכבר התקררה?

מה המודל צופה. הקרניים נמצאות בתוך הקרקע ולא מעליה. בקרקעיות הימות ובמישורי הבזלת, מכתשים שנחתו אחרי שהקרקעית התקררה נושאים קרניים (Aristarchus, Copernicus, Kepler), ומכתשים שנחתו כשהקרקעית עוד לא קפאה עד הסוף אינם נושאים קרניים (Delisle, Diophantus). בין המכתשים הקטנים והבינוניים של הצד הקרוב, אלה שבלי קרניים רבים מאלה שעם קרניים, משום שככל שהירח התרחק נחת עליו פחות חומר. Tycho, מכתש קרניים ברמות, הוא המקרה שעליו נבדק עומק הקרניים.

נתונים. תמונות LROC ומפת הימות של LROC; מפות הברזל ובשלות פני השטח של Kaguya Multiband; Imager; רשימות מכתשי הקרניים של Grier ועמיתיו (2001) ושל Werner ו-Medvedev (2010), שבה 1,615 מכתשי קרניים (מאמר 7, D.3, E.4§§); קטלוגים של מכתשי הצד הקרוב לספירת המכתשים שבלי קרניים.

שיטה. למפות את היקף כל מערכת קרניים ולחלק אותו בין קרקעיות של ימות ושל מישורי בזלת לבין קרקע של רמות, ליחידת שטח ולפי גודל המכתש, כך שההשוואה תהיה שווה מול שווה. בקרקעיות הימות ובמישורי הבזלת של הצד הקרוב, לספור את המכתשים הקטנים והבינוניים עם קרניים ובלי קרניים, באותם תחומי גודל ועל אותן קרקעיות, ולהשוות את שני המספרים. לאורך קרניים נבחרות, ובייחוד לאורך הקרניים של Tycho, לקרוא את הקרקעית ואת חומר הפליטה של מכתשים קטנים וטריים בתוך הקרן: חומר כהה שנחשף מתחת לקרן בהירה מסמן שכבה דקה שמונחת מלמעלה; חומר בהיר שנמשך בעומק מסמן קרן בתוך הקרקע.

היכן בסדרה. עדיין לא בסדרה כנושא; עלה ברשימות העבודה של המחבר (האוסף מ-16.10.2026; עודכן לקריאה הנוכחית של המחבר ב-17.10.2026). הסדרה נוגעת בקרניים במאמר 5, F.5§ (שדות הקרניים של 16 מכתשים צעירים הוסרו, עד חמישה קטרים, משני צדי ספירת הקרקעיות); במאמר 6, L.6§ (הקרניים של Copernicus באתר Apollo 12); ובמאמר 7, D.3§ (מכתשי הקרניים, אחידים באורך). קשור: נושאים 50 (חומר נפלט שנלכד אחרי השחרור) ו-58 (המכתשים הצעירים של הקטבים).

חלק F — הקטבים

מאמר 7 קורא את הצטופפות המכתשים העתיקים לעבר קטבי הירח (יחס צפיפות בין הקוטב לקו המשווה של 0.05 ± 1.20 בספירה הנקייה) כסימן לשינוי הצורה של הגוף: המכתשים נוצרו בזמן שהגוף היה פחוס בגלל סיבובו, וכשהוא התעגל פנימה פני השטח הקוטביים התכווצו בעוד המכתשים שמרו על גודלם, כך שהם התקרבו זה לזה. מכתשים שנוצרו אחרי שהירח היה עגול לא אמורים להראות הצטופפות כזאת. חלק זה אוסף את הנושאים שבודקים את הרצף הזה: המכתשים הצעירים, הצורה של גוף בעל קליפה קשיחה, הגאות על גוף שמוחזק בבסיסו, המרווחים, הסימנים הטקטוניים של הקליפה, והפרטים שבתוך הכיפות הקוטביות. הנושאים חשובים משום שהרשומה הקוטבית היא הראיה של המודל לכך שהירח היה פעם פחוס, ולכן שהוא התעגל על האגס של כדור הארץ ולא נוצר עגול.

מס'	נושא	מוכנות
58	המכתשים הצעירים של הקטבים	נתונים ציבוריים
59	צורה עם חוזק והרפיה בשתי שכבות	מידול חדש
60	הגאות על גוף שמוחזק בבסיסו	מידול חדש
61	המרווחים בין מכתשי הקטבים	נתונים ציבוריים
62	סימני הקליפה	נתונים ציבוריים
63	הכיפות הקוטביות הפנימיות ביותר	נתונים חדשים
64	מכתשי הקטבים הרדודים יותר	נתונים ציבוריים
65	כיוון המכתשים המוארכים בקווי רוחב בינוניים	נתונים ציבוריים
66	הסרגל הקוטבי: תחילת ההרים המרכזיים	נתונים ציבוריים
67	אליפטיות המכתשים, והקטבים מול חגורת הקצה	נתונים ציבוריים

רוב הנושאים הקוטביים הם ספירות ומדידות על קטלוגים ציבוריים. שני הנושאים הכתומים הם הפיזיקה של הצורה; הנושא הכחול היחיד ממתין לקטלוג שמגיע למכתשים קטנים יותר ליד הקטבים.

58 המכתשים הצעירים של הקטבים

זהו המבחן הנקי ביותר של הקריאה הקוטבית. אם ההצטופפות באה מן ההתעגלות, מכתשים שנוצרו אחרי שהירח היה עגול חייבים להיות מפוזרים באופן שווה בקווי הרוחב, ביחס בין הקוטב לקו המשווה של כ-1.0; אם הם מראים את היחס 1.2 של האוכלוסייה העתיקה, להצטופפות יש סיבה אחרת. המדגמים הנוכחיים של מכתשים צעירים נותנים 0.92 ו-1.12–1.16: מתיישבים עם המודל, אך קטנים מכדי להכריע.

השאלה. במדגם מתוארך של כ-150 מכתשים צעירים בכיפות הקוטביות (וכ-300 ברצועה), האם היחס בין הקוטב לקו המשווה הוא כ-1.0 או 1.2 של האוכלוסייה העתיקה?

מה המודל צופה. מכתשים שנוצרו אחרי שהירח היה עגול אחידים בקווי הרוחב (0.9–1.1). המדגמים הנוכחיים נותנים 0.92 ו-1.12–1.16 — מתיישבים, אך לא מכריעים (מאמר 7).

נתונים. (2019) Mazrouei et al., טבלה S1 (הגרסה שפורסמה); 1,615 המכתשים בעלי הקרניים של Werner ו-Medvedev (2010); מדגמים מתוארכים חדשים.

שיטה. ספירה נקייה לפי קו רוחב על מדגם מאומת וגדול יותר.

היכן בסדרה. מאמר 7, E.3§§, D.3 (פריט 3), פריט עבודה עתידית 2; מאמר 1, F.3§, פריט 7; מאמר 1, D.1§ (השורה הכתומה של מאמר 7).

59 צורה עם חוזק והרפיה בשתי שכבות

צורת Maclaurin היא הצורה הפחוסה שמקבל גוף אחיד ונוזלי לחלוטין כשהוא מסתובב. היא נותנת את הפחיסות הגדולה ביותר שהגוף יכול היה לקבל, ולכן חסם עליון על ההצטופפות הקוטבית. גוף בעל קליפה קשיחה נפח פחות, וכך מצר את התחזית מלמטה. הפנים, שצמיגותו (ההתנגדות לזרימה) $10^{21}-10^{22}$ Pa·s, והקליפה, שצמיגותה כ- 10^{23} Pa·s, גם הורפו בקצבים שונים, והאופן שבו חלקו ביניהם את ההתכווצות קובע את המעוות שנשאר בקליפה.

השאלה. כמה מן הפחיסות הנוזלית קיבל גוף בעל קליפה קשיחה, ואיך חלקו הפנים ($10^{21}-10^{22}$ Pa·s) והקליפה (10^{23} Pa·s) את ההתכווצות?

מה המודל צופה. הצורה הנוזלית נותנת את החסם העליון; קליפה קשיחה מצרה את התחזית מלמטה. המעוות בקליפה הוא התקצרות בקטבים והיסדקות בקו המשווה (מאמר 7).

נתונים. היחס הנקי שנמדד, 0.05 ± 1.20 .

שיטה. צורת Maclaurin עם חוזק; הרפיה ויסקו-אלסטית בשתי שכבות (מודל שבו כל שכבה מגיבה תחילה באופן אלסטי ואחר כך בזרימה איטית) לאורך שלב החיבור.

היכן בסדרה. מאמר 7, פריטי עבודה עתידית 1 ו-3, C.7§§, C.1–C.2; מאמר 1, F.2§, טבלת החישובים הפתוחים.

60 הגאות על גוף שמוחזק בבסיסו

בזמן שהיה מחובר לאגס, הגוף נמתח על ידי הגאות לאורך הקו אל כדור הארץ, בנוסף לפחיסות שנבעה מסיבובו. מאמר 7 קורא את צפיפות המכתשים בכיפות של 30° סביב שש נקודות: הנקודה שמתחת לכדור הארץ, הנקודה המובילה, הנקודה הקוטבית הדרומית, הנקודה הנגדית לכדור הארץ, הנקודה הקוטבית הצפונית והנקודה המאספת. מאמר 7 מודד את סדר ששת הצירים, את הכתר הצפוף של הצד הרחוק ואת היחס של המכתשים הגדולים ביותר (0.38 ± 1.84), ודורש שהכתר של הכיפה לא התכווץ כפי שקצה חופשי היה מתכווץ. הצורה הגאותית שהייתה נותנת את המספרים האלה עדיין לא חושבה.

השאלה. האם הצורה הגאותית של גוף שמוחזק בבסיסו נותנת את סדר ששת הצירים כמספר, את הכתר הצפוף של הצד הרחוק, ואת היחס של המכתשים הגדולים ביותר (0.38 ± 1.84)?

מה המודל צופה. הגוף נמתח לאורך הקו אל כדור הארץ בנוסף לפחיסות שנבעה מסיבובו. הכתר של הכיפה לא התכווץ כקצה חופשי; זוהי דרישה, לא תוצאה שנגזרה (מאמר 7).

נתונים. צפיפויות המכתשים על ששת הצירים (מאמר 7, A.9§); הנקודה הנגדית לכדור הארץ, 221 אחרי המסכה.

שיטה. הצורה הגאותית והרפיית בזה הזמן שהגוף עלה.

היכן בסדרה. מאמר 7, פריט עבודה עתידית 6, E.2§§ ("הכתר של הצד הרחוק"), A.9, D.2; מאמר 1, F.2§, טבלת החישובים הפתוחים.

61 המרווחים בין מכתשי הקטבים

הקריאה הקוטבית אומרת שהמכתשים שמרו על גודלם בזמן שפני השטח שביניהם התכווצו. ספירת צפיפות מראה זאת בעקיפין. המדד הישיר הוא המרחק מכל מכתש לשכנו הקרוב ביותר, לפי מחלקות קוטר: אם הרווחים נסגרו, מכתשי הקטבים צריכים לשבת קרוב יותר זה לזה ממכתשים משווניים באותו גודל.

השאלה. האם הרווחים בין מכתשי הקטבים נסגרו, כשהם נמדדים ישירות כמרחקים לשכן הקרוב ביותר, לפי קוטר?

מה המודל צופה. המכתשים שמרו על גודלם בזמן שפני השטח שביניהם התכווצו (מאמר 7).

נתונים. קטלוג Robbins.

שיטה. סטטיסטיקה של השכן הקרוב ביותר, הכיפות הקוטביות מול החגורה המשוונית.

היכן בסדרה. מאמר 7, פריט עבודה עתידית 7, D.2§.

62 סימני הקליפה

קליפה קשיחה שמתכווצת בקטבים מתקצרת שם, וקליפה שנמתחת בקו המשווה נסדקת. ההתקצרות משאירה מצוקים אונתיים (lobate scarps — מצוקים נמוכים ומעוקלים שבהם הקרום נדחף על עצמו) ורכסי קמטים; המתיחה משאירה גרביים (שקעים ארוכים שבהם רצועת קרום צנחה בין שני העתקים). פיזורם בקווי הרוחב, מחוץ לימות, הוא מבחן שאינו תלוי במכתשים.

השאלה. האם מבני ההתקצרות מרוכזים לעבר הקטבים ומבני המתיחה לעבר קו המשווה, מחוץ לימות?

מה המודל צופה. כפי שהקליפה הקשיחה של מאמר 7, C.7§ דורשת; מבחן שאינו תלוי במכתשים (מאמר 7).

נתונים. קטלוגים של מצוקים אונתיים, רכסי קמטים וגרביים.

שיטה. פיזור המבנים בקווי הרוחב.

היכן בסדרה. מאמר 7, פריט עבודה עתידית 8, C.7§.

63 הכיפות הקוטביות הפנימיות ביותר

ההתכווצות צריכה להיות הגדולה ביותר בקטבים עצמם, ולכן ההצטופפות צריכה לעלות בתוך 10 מעלות הרוחב האחרונות. הספירות הנוכחיות שם קטנות מכדי להראות זאת: 86 מכתשים בצפון ו-36 בדרום. קטלוג שמגיע אל מתחת ל-20 ק"מ ליד הקטבים ייתן את המספרים הדרושים.

השאלה. איך משתנה ההצטופפות בתוך 10° מכל קוטב, שם ההתכווצות צריכה להיות הגדולה ביותר?

מה המודל צופה. העודף גדול ביותר בקטבים. הספירות הנוכחיות קטנות מדי (86 מכתשים בצפון, 36 בדרום) (מאמר 7).

נתונים. הדור הבא של הקטלוגים, מתחת ל-20 ק"מ.

שיטה. חתכים בתוך 10° מכל קוטב.

היכן בסדרה. מאמר 7, פריט עבודה עתידית 10, D.4§.

64 מכתשי הקטבים הרדודים יותר

מכתשי קטבים של 20–100 ק"מ רדודים יותר ממכתשים משווניים: יחס עומק לקוטר (d/D) של כ-0.062 לעומת 0.074. שתי סיבות יכולות לתת זאת. ייתכן שהקליפה התקצרה סביב המכתשים ודחפה את רצפותיהם כלפי מעלה, וייתכן שמכתשי הקטבים פשוט עתיקים ובלויים יותר. הסדרה לא הפרידה בין השתיים.

השאלה. האם מכתשי הקטבים של 20–100 ק"מ רדודים יותר (d/D של כ-0.062 לעומת 0.074) משום שהקליפה התקצרה סביבם, או בגלל בלייה מאוחרת?

מה המודל צופה. לא הופרד בסדרה (מאמר 7).

נתונים. עומקים של LOLA; מחלקות בלייה.

שיטה. חיפוש מבני התקצרות סביב המכתשים, מול בלייה רגילה.

היכן בסדרה. מאמר 7, E.2§.

65 כיוון המכתשים המוארכים בקווי רוחב בינוניים

בין המכתשים המוארכים ביותר (אליפטיות $e > 1.2$, היחס בין הציר הארוך לקצר) בקווי רוחב 30° – 60° , 45%–51% מכוונים צפון–דרום, לעומת 20%–25% במקומות אחרים. גודל האפקט הוא עשירית או פחות ממה שעיוות יחד עם פני השטח היה יוצר, ולכן המודל אינו גוזר אותו; הוא נמדד. לפני שקוראים אותו באופן פיזיקלי יש לבדוק אותו מול תאורת שמש נמוכה, שעלולה לגרום לשפות ששורטטו מתוך תמונות להיראות מוארכות בכיוון האור.

השאלה. האם הכיוון צפון–דרום של המכתשים המוארכים ביותר ($e > 1.2$) בקווי רוחב 30° – 60° (45%–51% לעומת 20%–25%) אמיתי, או תוצר של תאורת שמש נמוכה?

מה המודל צופה. גודלו עשירית או פחות ממה שעיוות עם פני השטח היה נותן. הוא נמדד, לא נגזר (מאמר 7).

נתונים. שרטוטי שפות מתוך תמונות שהוארו מכיוונים שונים.

שיטה. בדיקת תאורה של השפות של Robbins; חזרה על הבדיקה בשפות ששורטטו באופן בלתי תלוי.

היכן בסדרה. מאמר 7, D.5§§, E.2.

66 הסרגל הקוטבי: תחילת ההרים המרכזיים

מכתשים שקוטרם מעל ערך מסוים יוצרים הר מרכזי; מתחתיו הם קערות פשוטות. הקוטר של המעבר הזה תלוי בכבידה ובחוזק המטרה, לא בהתכווצות מאוחרת של פני השטח. אם מכתשי הקטבים שמרו על גודלם, כפי שהמודל דורש, המעבר חייב להיות באותו קוטר בקטבים ובקו המשווה. זהו סרגל שהמכתשים נושאים בעצמם.

השאלה. האם הקוטר שבו מופיעים הרים מרכזיים זהה בקטבים ובקו המשווה?

מה המודל צופה. אותו קוטר מעבר: המכתשים שמרו על גודלם (מאמר 7, D.5§§, D.2).

נתונים. קטלוג של מכתשים בעלי הרים מרכזיים מתחת ל-15 ק"מ.

שיטה. ספירה של מכתשים בעלי הר מרכזי, לפי גודל, בכיפות הקוטביות וברצועה.

היכן בסדרה. מאמר 7, D.5§.

67 שני נושאים שנשארו מחוץ למודל: אליפטיות המכתשים, והקטבים מול חגורת הקצה

מאמר 7 בחן שתי שאלות נוספות והשאיר כל אחת מהן כמחקר בפני עצמו, משום שכל אחת דורשת הגדרות משלה לאזור ולצורה. הראשונה שואלת אם ההתכווצות השאירה הארכה כלשהי במכתשים. השנייה משווה את

הכיפות הקוטביות לא לקו המשווה אלא לחגורת הקצה של מאמר 11 — האזור שעמד בשולי הצד הקרוב בשלב החיבור. בלי חלקיה הקוטביים, חגורת הקצה מכילה כ-149 מכתשים ל- 10^6 קמ"ר, לעומת 219 בכיפות הקוטביות. **השאלה.** (א) האם ההתכווצות השאירה הארכה כלשהי במכתשים? (ב) איך משתוות הכיפות הקוטביות לחגורת הקצה של מאמר 11 ולא לקו המשווה (כ-149 לעומת 219 ל- 10^6 קמ"ר)?

מה המודל צופה. שתיהן נבחנו במאמר 7 והושארו כמחקרים בפני עצמם, עם הגדרות משלהם לאזור ולצורה (מאמר 7).

נתונים. קטלוג Robbins.

שיטה. הגדרות וספירות בלתי תלויות.

היכן בסדרה. מאמר 7, פריט עבודה עתידית 4.

G — South Pole–Aitken חלק

South Pole–Aitken (SPA) הוא האגן הגדול והעתיק ביותר על הירח, שקע רחב בצד הרחוק. בסדרה הוא אינו צלקת של מכה מבחוץ. מאמר 8 (South Pole–Aitken) קורא אותו כקצה הרחוק של מסלול חום: בזמן שהירח היה מחובר לקצה האגס, חום מפנים כדור הארץ נכנס אל הגוף דרך שתי יציאות בצד הקרוב — Imbrium, היציאה הראשית (הברנר), ו-Serenitatis, היציאה המשנית — חצה אותו ועלה אל מתחת לקרום הדק של הצד הרחוק. שם הוא הרים כיפה, דחס את העמודה שמתחתיה, סגר את נקבוביותיה ומחק חלק מרשומת המכתשים שלה. מאמר 8 מדד חמש רשומות של החום הזה עצמו (מחקרים 1–5, כולם ירוקים) ושקל שבע-עשרה אנומליות שפורסמו. חלק זה אוסף את מה שנשאר פתוח: הפיזיקה והתקציבים של מסלול החום (נושאים 68–70), המבחנים של חלק F במאמר 8 שדורשים נתונים חדשים או ספירה חדשה (71–76), ושתי המגבלות שמאמר 8 ציין בעצמו על מחקריו (77–78). הנושאים חשובים למודל משום ש-SPA הוא המקום שבו הצד הקרוב והצד הרחוק קשורים זה לזה בסיבה אחת; כל נושא או מחזק את הקשר הזה או מציין את התצפית שתנתק אותו.

הטבלה מונה את שנים-עשר הנושאים של חלק זה. צבע התא הימני הוא מידת המוכנות של כל נושא: ירוק — אפשר לבצע כבר עכשיו על נתונים ציבוריים; כתום — דורש מידול חדש; כחול — דורש משימה, דגימות או נתונים חדשים.

#	נושא	מקור	מוכנות
68	מודל פיזיקלי של ציר החום ותקציב האנרגיה שלו	מאמר 8 G§	מידול חדש
69	תקציב חמצון-חיזור למעטפת המחוזרת שמתחת ל-SPA	מאמר 8 G§, B12	מידול חדש
70	המבחנים הדינמיים, מחושבים מחדש בקבועי הסדרה	מאמר 8 D§	מידול חדש
71	מפל הנדיפים והחמצון-חיזור לרוחב האגן	מאמר 8 F§	נתונים חדשים
72	מכתשים רדודים ומינימום העומק אחרי מסכת הימות	מאמר 8 F§	נתונים ציבוריים
73	מבחן האפס ל-Serenitatis, ומבחן מחוץ למדגם	מאמר 8 F§	נתונים ציבוריים
74	ים מוקדם גדול ב-SPA, שנקבר מאוחר יותר	מאמר 8 F§, B9	מידול חדש
75	הרסס המאוחר של שברים קטנים	מאמר 8 F§, B1h	נתונים ציבוריים
76	שתי אוכלוסיות מכתשים ושוליים גבוהים יותר במכתשים צעירים	מאמר 8 F§, B1k	נתונים ציבוריים

77	היפוך ישיר של הנקבוביות	מאמר 8 § 6, G. B6	נתונים ציבוריים
	עבור SPA		
78	הקרום החסר של SPA	מאמר 8 § 5, G. B4–B5	נתונים ציבוריים
79	אדים שאידו מתכות ב-SPA, ולאן הלכו	מאמר 8, B11	נתונים חדשים

כשקוראים את העמודה הימנית מלמעלה למטה רואים את מבנה החלק: שלושת הנושאים שפותחים אותו הם הפיזיקה של המסלול ודורשים מודלים חדשים; באמצע החלק יש גוש של מבחנים שאפשר לבצע כבר היום על מפות ותמונות ציבוריות; ושני האחרונים הופכים את המגבלות שמאמר 8 ציין למדידות.

68 מודל פיזיקלי של ציר החום ותקציב האנרגיה שלו

מאמר 8 ממקם את מסלול החום לפי הסימנים שהשאר: שתי יציאות בצד הקרוב, כיפה ומרכז חם בצד הרחוק, כולם על קו אחד מצפון לדרום. מה שהוא עדיין אינו נותן הוא הפיזיקה של המסלול עצמו. מקור חום שפעל לאורך כל שלב החיבור — במודל כ-600 מיליון שנה מתחילת הבליטה ועד השחרור לפני 3.873 מיליארד שנה (Ga 3.873), ולפחות כ- 10^7 שנים, החסם ששימש להערכת הצמיגות — היה צריך להעביר דרך הגוף די אנרגיה כדי לבצע את העבודה שמחקרים 1, 2 ו-5 מדדו. נושא זה מבקש את חשבון האנרגיה הזה.

השאלה. האם החום שחצה את הגוף המחובר מן היציאות של Imbrium ושל Serenitatis הספיק כדי לדחוס את העמודה, לסגור את הנקבוביות ולמחוק את המכתשים של SPA?

מה המודל צופה. מקור חום אחד ארוך-ימים, הברנר, שפעל לאורך שלב החיבור (מאמר 8). העבודה שהוא היה צריך לבצע מדודה: צפיפות מכתשים במרכז של 0.51 מזו שממש מחוץ לשוליים (מחקר 1); שארית עומק של 1.1–1.8 ק"מ במרכז, המתאימה לעמודה של 9–15 ק"מ שאיבדה 12% מחללי הריק שלה (מחקר 2); ונקבוביות בעומק 10 ק"מ שנסגרו ל-2.9%–4.4% במרכז (מחקר 5).

נתונים. התוצאות של מחקרים 1, 2 ו-5 במאמר 8; הגאומטריה של המסלול (היציאות, הכיפה, המרכז החם) מחלק C של מאמר 8.

שיטה. מודל של הסעת החום לאורך המסלול, מן היציאות ועד הקרום של הצד הרחוק, ושל האנרגיה שנמסרה לאורך שלב החיבור, בהשוואה לאנרגיה הדרושה לדחיסה ולמחיקה שנמדדו.

היכן בסדרה. מאמר 8 § G, עבודה עתידית 1; מאמר 1 § F.2 (חישובים פתוחים: ציר החום, האנרגיה שלו ותקציב החמצון-חיזור שלו).

69 תקציב חמצון-חיזור למעטפת המחוזרת שמתחת ל-SPA

הפוגסיות של החמצן (oxygen fugacity) בתוך התכה מודדת כמה חמצן חופשי היה זמין כשהיא נוצרה. היא נמסרת ביחס לתגובת ייחוס, בופר ברזל-ווסטיט (IW): ΔIW הוא מספר סדרי הגודל מעליו או מתחתיו, כך שערך שלילי יותר פירושו התכה מחוזרת יותר, ענייה יותר בחמצן. שברי בזלת שהביאה Chang'e-6 מתוך SPA נותנים $\Delta IW = -1.93$, לעומת -0.80 בצד הקרוב — מעטפת מתחת ל-SPA ענייה בחמצן במידה ניכרת. המודל קורא זאת כפעולה של אותו מקור חום: חום ממושך מסלק חמצן, וברזל מתכתי מפנים כדור הארץ קולט את מה שנשאר.

השאלה. כמה חום וכמה ברזל מתכתי נדרשים כדי להוריד את פוגסיות החמצן מ-0.80 ל- $\Delta IW = -1.93$, והאם הדבר מתיישב עם תקציב החום של נושא 68?

מה המודל צופה. חמצן שסולק בחום ונצרך על ידי ברזל מפנים כדור הארץ (מאמר 8, B12). החום והברזל שהתקציב דורש צריכים ליפול בתחום מה שמסלול החום סיפק.

נתונים. שבירי הבזלת של Chang'e-6 (23 שבירים, שנמדדו בשתי שיטות).

שיטה. מאזן מסות של חמצון-חיזור: החמצן שיש לסלק מאזור המקור, הברזל שיצרוך אותו והחום שיניע את התהליך, מול נושא 68.

היכן בסדרה. מאמר 8 G§, עבודה עתידית 2; מאמר 8 B12.

70 המבחנים הדינמיים, מחושבים מחדש בקבועי הסדרה

חלק D של מאמר 8 שאל אם המספרים מאפשרים לחומר ולחום לנוע מפנים כדור הארץ אל הצד הרחוק של הגוף המחובר: מהירות הזרימה וזמן המעבר שלה, האנרגיה והלחץ, מחסום הפוטנציאל וההקלה שלו בגוף רציף, סימן הכוח השקול וזווית היציאה. המבחנים האלה נעשו לפני שהסדרה קבעה את קבועיה. יש לחזור עליהם בקבועים שהסדרה משתמשת בהם כעת, כך שכל מספר במאמר 8 יישען על אותו מצב כמו במאמרים 3 ו-4. רדיוס הקורטציה הוא המרחק שבו גוף שנע במסלול חופשי שומר על קצב אחד עם סיבוב כדור הארץ; הוא נקבע על ידי אורך היום ומסת כדור הארץ.

השאלה. ביום של 5.77 שעות, עם רדיוס הקורטציה של המצב הזה ומסת גוף-האם של הסדרה, מהם מחסום הפוטנציאל האפקטיבי ולחץ הבסיס עבור גוף בצורה של מאמר 3 (LEF Mechanism in Practice)?

מה המודל צופה. החישוב מחדש נדרש על ידי מאמר 8 D.3a§. המודל דורש שהמחסום יוקל בגוף רציף ושלחץ הבסיס יספיק כדי להניע את הזרימה.

נתונים. אין נתונים חדשים; חישוב מחדש בקבועים של מאמרים 3 ו-4.

שיטה. חזרה על מבחני המהירות, זמן המעבר, האנרגיה, המחסום, הסימן וזווית היציאה של חלק D במאמר 8, בקבועי הסדרה.

היכן בסדרה. מאמר 8 G§, עבודה עתידית 3, ו-D.5§-D.1; מאמר 1 F.2§.

71 מפל הנדיפים והחמצון-חיזור לרוחב האגן

אם SPA חומם ממרכז, סימני החום צריכים להיחלש כלפי חוץ. יסודות נדיפים — כאלה שמתאדים בקלות, כמו מים והאלקליים — מסולקים יותר מכול במקום שבו החום חזק ביותר, ואובדן החמצן הולך באותה תבנית. הדגימות של Chang'e-6, שנלקחו כ-210 ק"מ ממינימום המכתשים, כבר מראות מעטפת שאיבדה את הנדיפים שלה בחימום (מאמר 8, B11). נקודת דגימה אחת אינה יכולה להראות מפל; מפות יכולות.

השאלה. האם אובדן הנדיפים והחיזור חזקים ביותר ליד מינימום המכתשים (45.4° דרום, 197.9° מזרח) וחלשים יותר לעבר השוליים?

מה המודל צופה. מרכז מחומם, שהחתימה שלו נחלשת כלפי חוץ לאורך אותו פרופיל רדיאלי כמו חוסר המכתשים (מאמר 8 חלק F, שורה 2).

נתונים. תוריום (Th), תחמוצת ברזל (FeO) והידרוקסיל (OH) ממפות מסלוליות, שנדגמו במינימום ובטבעות סביבו.

שיטה. פרופילים רדיאליים על אותן טבעות כמו במחקר המכתשים של מאמר 8 (מחקר 1), עם אותן מסכות.

היכן בסדרה. מאמר 8 חלק F, שורה 2, ו"מבחנים שדורשים נתונים חדשים".

72 מכתשים רדודים והמינימום המרחבי של העומק אחרי מסכת הימות

מחקר 1 מצא שמכתשים של 40–80 ק"מ ב-20° המרכזיות של SPA רדודים ב-18% מאלה שבחגורת השוליים. שתי סיבות יכולות לעשות מכתש רדוד: חום מלמטה שדחס את רצפתו והרים אותה, או לבה שמילאה אותו מאוחר יותר. המודל קורא זאת כסיבה הראשונה. אפשר להפריד בין השתיים לפי המקום: מילוי לבה נמצא במקום שבו יש לבה, מתחת לימות הנראים ומתחת לימות סמויים (cryptomaria) — מישורי לבה החבויים מתחת לכיסוי מאוחר של חומר, שמזהים אותם לפי החומר הכהה שמכתשים קטנים חופרים ומעלים דרך הכיסוי.

השאלה. האם המכתשים הרדודים נשארים גם מחוץ לבזלות הקבורות, והיכן המכתשים רדודים ביותר אחרי שמסירים את הימות ואת ההילות שסביבם?

מה המודל צופה. ההרדדה באה מן הברנר, לא ממילוי לבה (מאמר 8). מכתשים רדודים צריכים להישאר במקומות שאין בהם לבה, ומינימום העומק צריך לשכון יחד עם מינימום המכתשים (חלק F, שורה 3).

נתונים. עומקי מכתשים ממד הגובה הלייזרי (Lunar Orbiter Laser Altimeter (LOLA; מפות של ימות ושל ימות סמויים.

שיטה. מפות של עומק המכתשים עם מסכת הימות (הימות, הימות הסמויים והילה סביב כל אחד מהם מוסרים), ומיקום מינימום העומק.

היכן בסדרה. מאמר 8 חלק F, שורה 3, ו"מבחנים שדורשים נתונים חדשים".

73 מבחן האפס ל-Serenitatis, ומבחן מחוץ למדגם

מינימום המכתשים של SPA שוכן על קו האורך של הנקודה שמול Serenitatis (197.9° לעומת 198.8°). האנטיפוד של נקודה הוא הנקודה שבצד הנגדי של הכדור. קורא עשוי להשיג שבצד הקרוב יש פתחים רבים, ושהאנטיפוד של אחד מהם היה מוכרח ליפול ליד החוסר. נושא זה עונה על ההשגה במדידה, בשתי דרכים: בשאלה באיזו תדירות המקרה לבדו נותן התאמה כזו, ובבדיקת הקריאה על נתונים שלא שימשו לבנייתה.

השאלה. האם חוסר הממוקם באותה מידה של דיוק לעבר אנטיפוד היה נוצר במקרה עבור כל פתח שהוא? האם הקריאה עומדת על נתונים שלא שימשו לבנייתה?

מה המודל צופה. החוסר הולך אחר האנטיפודים של הפתחים בצד הקרוב, Serenitatis-I Imbrium (מאמר 8). בין כל הפתחים, ההתאמה צריכה להיות נדירה במקרה. חוסר שאין לו קשר לאנטיפודים של פתחי הצד הקרוב ישאיר את הברנר בלי מקומו (חלק F, שורה 6).

נתונים. קטלוג הפתחים (מאמר 5, הימות (The Maria), נספח A); קטלוגי מכתשים שפורסמו.

שיטה. מבחן פרמוטציה על כל הפתחים: מחשבים את האנטיפוד של כל אחד, מודדים עד כמה החוסר ממוקם היטב לעברו, ומוציאים את הדירוג של Serenitatis. אחר כך מבחן על נתונים שהוצאו מראש, בקטלוג מכתשים או בתחום גדלים שלא שימשו במחקר 1.

היכן בסדרה. מאמר 8 חלק F, שורה 6, ו"מבחנים שדורשים נתונים חדשים".

74 ים מוקדם גדול ב-SPA, שנקבר מאוחר יותר

בתוך SPA הימות הנראים הם כתמים קטנים. המודל קורא אותם כראשיו של ים מוקדם גדול יותר — פתח ששפך פעם בזלת על פני חלק רחב של האגן, אחר כך נסגר, וכוסה בחומר שנחת מאוחר יותר. אם כך, הבזלת הקבורה צריכה להשתרע הרבה מעבר לכתמים הנראים, ומשקלה צריך להופיע בשדה הכבידה. כבידת בוגה (Bouguer gravity) היא שדה הכבידה אחרי שמסירים ממנו את המשיכה של הטופוגרפיה הנראית; מה שנשאר מראה חומר צפוף או קל מתחת לפני השטח.

השאלה. האם הבזלות הקבורות משתרעות הרבה מעבר לכתמים הנראים, והאם שדה הכבידה מראה את העומס של מילוי בזלת קבור?

מה המודל צופה. ים מוקדם גדול, סגור וקבור (מאמר 8, B9, A.5). אם הבזלות הקבורות נגמרות בכתמים הנראים ושדה הכבידה אינו מראה מילוי קבור, לא היה ים מוקדם גדול (חלק F, שורה 7).

נתונים. מכתשים בעלי הילה כהה (מכתשים קטנים שחופרים בזלת כהה דרך כיסוי בהיר יותר); ספקטרומים מ-Moon Mineralogy Mapper (³M); כבידת בוגה של GRAIL.

שיטה. מפה של הבזלות הקבורות ממכתשים בעלי הילה כהה ומספקטרומים; מודל כבידה של מילוי הבזלת, עוביו והשתרעותו.

היכן בסדרה. מאמר 8 חלק F, שורה 7; B9; A.5.

75 הרסס המאוחר של שברים קטנים

במודל, השלבים המאוחרים של הגוף המחובר לא השליכו מסות גדולות אלא רסס של שברים קטנים. בצד הרחוק משך הסיבוב כלפי חוץ: כמו גלגל רטוב מסתובב שמתיז טיפות ולא דליים, הוא קילף מפני השטח שברים קטנים שהוחזקו בחולשה, ואלה חזרו ונחתו כמכתשים קטנים וטריים על גבי המכתשים הישנים והגדולים. המבחן הראשון נעשה: בתוך SPA היחס בין מכתשים קטנים לגדולים הוא 4.62, לעומת 2.13 במקומות אחרים (B1h). המבחן השני הוכן והוקפא, כך שאי אפשר לעצב את תוצאתו לאחר מעשה.

השאלה. האם המכתשים הקטנים שעל מכתשים-מארחים גדולים בתוך SPA טריים, בזמן שהמארחים שלהם שחוקים?

מה המודל צופה. רסס מאוחר של שברים קטנים (מאמר 8). המבחן השני קבוע: 20 מכתשים-מארחים של 40–80 ק"מ בתוך SPA ו-20 בקבוצת ביקורת באותם קווי רוחב, שהוקפאו לפני הבדיקה, עם 2,634 מכתשים קטנים מועמדים, שמסווגים לפי קריטריונים קבועים ומדורגים בסולם טריות קבוע (עומק ביחס למכתשים טריים באותו גודל; Krüger et al. 2018). המבחן הוא חלק F, שורה 8.

נתונים. תמונות של המצלמה צרת הזווית של Lunar Reconnaissance Orbiter (LROC NAC).

שיטה. בדיקה של כל מכתש לפי הקריטריונים הקבועים, ורישומה לפני כל השוואה בין SPA לקבוצת הביקורת.

היכן בסדרה. מאמר 8 חלק F, שורה 8; B1h.

76 שתי אוכלוסיות מכתשים ושוליים גבוהים יותר במכתשים צעירים בתוך SPA

ל-SPA יש במודל היסטוריה בשני חלקים: רשומת מכתשים ישנה שנמחקה בחלקה בחום, ומכתשים צעירים שנוצרו אחרי שהחום דחס את הקרקע. מכתש שנוצר במטרה דחוסה — חומר שנקבוביותו נסגרו — שומר על שוליים גבוהים יותר ממכתש שנוצר בקרקע נקבובית, שבולעת חלק מן החפירה בדחיסה. מחקר 1 כבר מצא במרכז מכתשים של 40–80 ק"מ ששוליהם גבוהים יותר מאשר בקבוצת ביקורת מותאמת (B1k); נושא זה מפריד את המכתשים לפי גיל.

השאלה. האם המכתשים הישנים שחוקים והצעירים טריים, והאם למכתשים צעירים בתוך SPA שוליים גבוהים יותר מאשר למכתשים צעירים מותאמים מחוצה לו?

מה המודל צופה. שתי אוכלוסיות בגילים שונים, ומכתשים צעירים שנוצרו במטרה דחוסה (מאמר 8). אוכלוסייה אחת בלבד, או היעדר הבדל בשוליים, יבטלו את ההיסטוריה הזו (חלק F, שורות 9–10).

נתונים. גילי מכתשים (דרגת שחיקה או ספירות על חומר הפליטה) וגובהי שוליים מ-LOLA.

שיטה. השוואה מותאמת, בתוך SPA ומחוצה לו, לפי גיל ולפי גודל.

היכן בסדרה. מאמר 8 חלק F, שורות 9–10; B1k.

77 היפוך ישיר של הנקבוביות עבור SPA

מחקר 5 מצא שהנקבוביות של SPA סגורות בעומק, ויותר מכול במרכז. ערכיו נגזרו באקסטרפולציה מהיפוכים שפורסמו של שדה הכבידה, המעריכים כיצד הצפיפות והנקבוביות משתנות עם העומק מתוך הקשר בין הכבידה לטופוגרפיה. מאמר 8 ציין זאת כמגבלה של המחקר: הערכים תלויים במודל העומק שנבחר. היפוך ישיר, שנעשה עבור SPA עצמו, מסיר את המגבלה הזו.

השאלה. האם היפוך שנעשה עבור SPA עצמו מאשר נקבוביות כמעט סגורות בעומק 10 ק"מ, ויותר מכול במרכז?

מה המודל צופה. בעומק 10 ק"מ, נקבוביות של 2.9%–4.4% במרכז, העולה ל-7.1%–8.8% בשוליים, לעומת 6.2%–12.8% בסביבה; בפני השטח, SPA נקבובי כמו הצד הרחוק שסביבו (מאמר 8, B6). החום בא מלמטה ודחס את השכבות העמוקות, בזמן שפני השטח חודשו בחומר שנחת מאוחר יותר.

נתונים. הכבידה של GRAIL; הטופוגרפיה של LOLA.

שיטה. היפוך אזורי של הצפיפות והנקבוביות כפונקציה של העומק, על טבעות שמרכזן במרכז האגן.

היכן בסדרה. מאמר 8 G.1§ (המגבלה של מחקר 5); B6.

78 הקרום החסר של SPA

הקרום של SPA דק, והקרום שחסר באגן חייב להימצא במקום כלשהו. במודל הוא החליק מן הכיפה העולה ונערם בשוליים. מחקר 3 מצא את הערימה הזו כטבעת חיצונית של קרום מעובה, 3.8–5.7 ק"מ, במרחק 50°–55° מן המרכז, בשבעה משמונה כיוונים, עבה במזרח וחסרה במערב. הטבעת הזו מחזיקה רק כ-37% מן הקרום החסר. מחקר 4 מצא טבעת פנימית שמחזיקה חלק מן השאר במערב. החשבון עדיין אינו סגור.

השאלה. היכן נמצא שאר הקרום החסר מ-SPA, בהינתן שהטבעת החיצונית מחזיקה כ-37% ממנו?

מה המודל צופה. הקרום החליק מן הכיפה העולה ונערם בשוליים; חלק ממנו נמצא בטבעת הפנימית במערב (מאמר 8, B4, B5). נפח האגן שהודלל צריך להתאזן מול שתי הטבעות יחד עם המגמה האזורית של הצד הרחוק.

נתונים. ארבעת מודלי הקרום של GRAIL.

שיטה. מאזן נפחים: הקרום החסר באגן שהודלל, מול הנפח בטבעת החיצונית, בטבעת הפנימית ובמגמה האזורית.

היכן בסדרה. מאמר 8 G.1§ (המגבלה של מחקר 3); B4; B5.

79 אדים שאידו מתכות ב-SPA, ולאן הלכו האדים

מאמר 8 (B11) מצא שהחום מתחת ל-SPA סילק יסודות נדיפים: היחס בין אשלגן לתוריום נמוך ואחיד בכל האזור המוחם (455–451 בתוך 30° מהמרכז, 16%–20% מתחת לרמות של הצד הרחוק, 563, ולשאר הצד הרחוק, 537), ובבזלות של Chang'e-6 גם האשלגן וגם הברזל כבדים איזוטופית — $\delta^{41}\text{K}$ של 0 עד +0.09% ו- $\delta^{56}\text{Fe}$ של 0.13%–0.21%, מול -0.29 עד -0.04% ו-0.11% בבזלות של הצד הקרוב מ-Apollo ו-Chang'e-5. ברזל מתאדה רק בחום חזק. ההצעה של המחבר מוסיפה נשא: מאגמה עשירה במים, שהברזר בישל אותה זמן

רב, שחררה אדים חמים בכמות גדולה, ואדי מים חמים מגבירים את ההתנדפות של מתכות, שיוצאות כתרכובות עם מים או עם כלור בטמפרטורה נמוכה יותר מאשר בוואקום. כך אפשר להסביר איך גם הברזל איבד את האטומים הקלים שלו. אם ההצעה נכונה, גם שאר המתכות שנעשות נדיפות יותר באדים — נתרן, אבץ ונחושת — צריכות להיות מדולדלות יחד עם האשלגן והברזל ולהיות כבדות איזוטופית, הכלור צריך להיות כבד, ומקור המעטפת צריך להיות יבש מאוד. מאמר 8 רושם ייבוש חריג (B11, B12), ומקורו עוד ממתין לציטוט. הוא משאיר פתוחה את השאלה לאן הלכו האדים: לחלל דרך הפתח, התעבו מחדש בשולי האגן, או שניהם — וכמה אבד. המתכות האחרות ומאזן האדים עוד לא נמדדו.

השאלה. האם מקור המעטפת מתחת ל-SPA יבש מאוד, והאם אבץ, נחושת, נתרן וכלור מדולדלים וכבדים איזוטופית יחד עם האשלגן והברזל? לאן הלכו האדים: לחלל, או שהתעבו בשוליים?

מה המודל צופה. חימום ממושך של מקור עשיר במים יצר אדים חמים שנשארו איתם מתכות. המקור יבש מאוד; אשלגן, נתרן, אבץ, נחושת וברזל מדולדלים יחד וכבדים איזוטופית; הכלור כבד איזוטופית. האשלגן והברזל נמדדו (מאמר 8, B11); שאר היסודות הם התחזית של נושא זה. אדים שהתעבו מחדש בשוליים היו משאירים שם את האיזוטופים הקלים שהמרכז איבד.

נתונים. דגימות Chang'e-6: תכולת המים במקור המעטפת, והאיזוטופים של Cl, K, Fe, Zn, Cu, מול הבזלות של Apollo ו-Chang'e-5; הנתרן והאשלגן שהתעבו מחדש בזכויות של Chang'e-6 (Li ועמיתיו 2026); היחס בין אשלגן לתוריום בשפה (567 בשוליים; מאמר 8, B11).

שיטה. למדוד את המתכות הנדיפות ואת הכלור בבזלות של Chang'e-6 כמערכת אחת, כדי להבחין בין דלדול משותף עם איזוטופים כבדים לבין ערבוב של חומרים (מודל הערבוב המשותף של K, Th, FeO והמינרלוגיה שמאמר 8 מציין ב-B11). לגבי גורל האדים: להשוות את האיזוטופים של הפאזות שהתעבו לאלה של השארית, ולחפש בשוליים את העודף של נדיפים ושל איזוטופים קלים שאדים שהתעבו מחדש היו משאירים; המאזן בין המרכז לשוליים נותן כמה עזב את הגוף.

היכן בסדרה. מאמר 8, B11 ("פתוח": לאן הלכו האדים וכמה אבד), B12 (המעטפת היבשה), ו-B6 (החללים שפתחו הגזים שיצאו). קשור: נושאים 68 (ציר החום ותקציב האנרגיה שלו), 69 (תקציב חמצון-חיזור למעטפת המחוזרת שמתחת ל-SPA) ו-71 (מפל הנדיפים והחמצון-חיזור לרוחב האגן).

תוצאה

חלק G בקצרה. מסלול החום של מאמר 8 ממוקם לפי סימניו ונמדד בחמישה מחקרים; מה שפתוח הוא הפיזיקה שלו (נושאים 68–70), המבחנים הנוותרים של חלק F במאמר 8 (71–76), ושתי המגבלות שצוינו (77–78); נושא 79 שואל מה עוד נשאו האדים, ולאן הלכו. שישה מתוך שנים-עשר הנושאים אפשר לבצע כבר עכשיו על נתונים ציבוריים.

חלק H — הפסים והאוקיינוס השקט

קרקעית האוקיינוס השקט הצפוני נחצית בפסים ארוכים, ישרים ומקבילים, הנמשכים ממזרח למערב לאורך אלפי קילומטרים, מ-Mendocino בצפון ועד Clipperton בדרום. מאמר 9 (הפסים, The Stripes) קורא אותם כצד הקדמי של האגס שעליו נבנה הירח. האגס עמד על האוקיינוס השקט, ובסיסו ליד Kiritimati (1.9° צפון, 157.5° מערב), ונטה לאחור נגד סיבוב כדור הארץ, כשקצהו מפגר מערבה. החזית שלו, הצד הקדמי (leading side), הפונה אל כיוון הסיבוב, נמתחה בזמן שהאגס עמד, והתקפלה לפסים כשהאגס נפל חזרה אל כדור הארץ; הגב שלו, הצד האחורי (trailing side), התקמט לקשתות של מערב האוקיינוס השקט. מאמר 9 ציין תשעה מחקרים שיהפכו את קריאותיו למדידות (נושאים 80–88). שני נושאים נוספים עוסקים בכדור הארץ העמוק ובאזור כולו: האזור האיטי של האוקיינוס השקט כאגס שחזר (89), ושחזור של הליתוספירה של האוקיינוס השקט שנעשה בלי המפה הירחית (90). הנושאים האלה חשובים למודל משום שהאוקיינוס השקט הוא הצד של כדור הארץ בניתוק: אם האגס עמד שם, הוא השאיר שם סימנים.

השמות שעל המפה (Mendocino, Murray, Molokai, Clarion, Clipperton ואחרים) משמשים כאן כשמות של מקומות בלבד. הנושאים של חלק זה קוראים את הפסים כפי שהסדרה קוראת אותם, כצד הקדמי המקופל של האגס; הם אינם עוסקים בשום קריאה אחרת.

#	נושא	מקור	מוכנות
80	מחקר 1 — קו המשווה, מותאם מחדש על עקבות מלאים	מאמר 9 G§	נתונים ציבוריים
81	מחקר 2 — מבחן המקריות של הבסיס על קו המשווה	מאמר 9 G§	נתונים ציבוריים
82	מחקר 3 — הפסים בצד אחד בלבד	מאמר 9 G§	נתונים ציבוריים
83	מחקר 4 — מדרגות בעומק ובגיל לרוחב כל פס	מאמר 9 G§	נתונים ציבוריים
84	מחקר 5 — הצד האחורי	מאמר 9 G§	נתונים ציבוריים
85	מחקר 6 — רציפות מתחת לרכסים	מאמר 9 G§	נתונים ציבוריים
86	מחקר 7 — רכסי השפכטל מול רכסים שנבנו מלמטה	מאמר 9 G§	נתונים ציבוריים
87	מחקר 8 — חותם המראה	מאמר 9 G§	נתונים ציבוריים
88	מחקר 9 — הפסים מתחת לשכבות המתוארכות	מאמר 9 G§	נתונים ציבוריים
89	האזור של האוקיינוס השקט כאגס שחזר (R10, R11)	מאמרים 3, 11	נתונים חדשים

מידול חדש	מאמר 11	90 שחזור בלתי תלוי של הליתוספרה של האוקיינוס השקט
-----------	---------	---

הטבלה מראה את אופיו של חלק זה: את תשעת המחקרים של מאמר 9 אפשר לבצע כולם כבר עכשיו, על בתימטריה, כבידה, רשתות גיל ורשומות קידוח שהן ציבוריות. סקר האיזוטופים של נושא 89 דורש דגימות חדשות של בזלות פלומה, ונושא 90 דורש שחזור חדש.

80 מחקר הפסים 1 — קו המשווה, מותאם מחדש על עקבות מלאים

כל פס שוכן לאורך מעגל קטן — מעגל על הכדור שמשורטט בזווית קבועה מקוטב, כפי שקו רוחב משורטט סביב הקוטב של כדור הארץ. פסים מקבילים על מעגלים קטנים סביב קוטב אחד מגדירים קו משווה משלהם, קו המשווה של מערכת הפסים. מאמר 9 מצא שקו המשווה הזה נוטה ביחס לקו המשווה של היום: ההתאמה הראשונה נותנת 11° , והוא חוצה את קו המשווה של היום ב- 159° מערב; בהתאמה מחדש על הנקודות של המחבר עצמו הנטייה היא לפחות 10° , ועד כ- 20° . בסיס האגס שוכן עליו. הערך המדויק, עם שגיאותיו, הוא הנושא הזה.

השאלה. מהי הנטייה של קו המשווה של הפסים, והיכן הוא חוצה את קו המשווה של היום, עם שגיאות?

מה המודל צופה. קו משווה אחד, הנוטה לפחות 10° (התאמה ראשונה 11° , ועד כ- 20°), העובר דרך בסיס האגס (מאמר 9).

נתונים. בתימטריה (GEBCO); עקבות של הפסים המלאים המשורטטים עליה.

שיטה. התאמה של מעגלים קטנים סביב קוטב משותף לעקבות שהחוקרים עצמם משרטטים לכל אורכו של כל פס, עם שגיאות מפיזור הנקודות.

היכן בסדרה. מאמר 9 G8, מחקר 1, E.1–E.3§; מאמר 1 F.3§, פריט 6.

81 מחקר הפסים 2 — מבחן המקריות של הבסיס על קו המשווה

בסיס האגס ליד Kiritimatı שוכן 1.6° מקו המשווה של מערכת הפסים. לכל נקודה יש סיכוי כלשהו לשכון קרוב לקו נתון, ולכן להתאמה יש משמעות רק אם היא נדירה. נושא זה מודד עד כמה היא נדירה.

השאלה. באיזו תדירות נקודה שממוקמת באקראי באזור נופלת בתחום $\pm 2^{\circ}$ מקו המשווה של המערכת?

מה המודל צופה. הבסיס שוכן על קו המשווה של המערכת, 1.6° ממנו (מאמר 9, B.2). אם מיקום כזה נדיר במקרה, זו התאמה בעלת משמעות; אם הוא שכיח, היא אינה כזו.

נתונים. כמו בנושא 80.

שיטה. מבחן מונטה קרלו: נקודות אקראיות רבות על פני האזור, והחלק מהן שנופל בתחום $\pm 2^{\circ}$ מקו המשווה המותאם, בחזרה על כל טווח ההתאמות של נושא 80.

היכן בסדרה. מאמר 9 G8, מחקר 2; B.2§.

82 מחקר הפסים 3 — הפסים בצד אחד בלבד

לאגס שנטה לאחור נגד הסיבוב היו שני צדדים שונים: חזית שנמתחה, וגב ששכב מתחת לקצה הנוטה. הסימנים שלהם צריכים להיות שונים בהתאם. הפסים צריכים להתחיל באזור הבסיס ולהימשך מזרחה, בצד הקדמי; מה שנמצא ממערב לבסיס צריך להיות משהו אחר — הכיפוף וההתכנסות של הקרקעית, והגב המקומט של האגס.

השאלה. האם הפסים מתחילים בבסיס ונמשכים מזרחה, והאם מה שנמצא ממערב לו הוא כיפוף והתקמטות, ולא המשך של אותם פסים?

מה המודל צופה. הפסים הם הצד הקדמי של האגס (מאמר 9, B.3, B.6).

נתונים. בתימטריה; מפות של האנומליות המגנטיות של קרקעית האוקיינוס.

שיטה. מעקב אחר כל פס מערבה מן הבסיס, ורישום המקום שבו הוא נגמר, מתכופף או מתכנס.

היכן בסדרה. מאמר 9 G§, מחקר 3; B.3§, B.6.

83 מחקר הפסים 4 — מדרגות בעומק ובגיל לרוחב כל פס

לרוחב כל פס הקרקעית עשויה להשתנות במדרגה, בעומק ובגיל המתוארך של פני השטח שלה. אם הפסים הם קפלים של מבנה אחד, הצד הקדמי של האגס, המדרגות האלה אינן צריכות להיות אקראיות; הן צריכות להיות מסודרות סביב הבסיס, ולגדול לעברו או ממנו והלאה.

השאלה. האם קרקעית האוקיינוס משתנה במדרגות של עומק וגיל לרוחב כל פס, בסדר שמאורגן סביב הבסיס?

מה המודל צופה. סדר סביב הבסיס, שקושר כל פס, אחד אחד, אל האגס (מאמר 9).

נתונים. בתימטריה; רשתות של גיל קרקעית האוקיינוס.

שיטה. פרופילים לרוחב כל פס; המדרגה בעומק ובגיל נקראת על כל אחד מהם, ומוצגת כפונקציה של המרחק מן הבסיס.

היכן בסדרה. מאמר 9 G§, מחקר 4.

84 מחקר הפסים 5 — הצד האחורי

הגב של האגס שכב מתחת לקצהו הנוטה, ממערב לבסיס. כשהאגס נפל חזרה, הצד הזה לא נמתח; הוא קרס והתקמט. מאמר 9 קורא את הקשתות של מערב האוקיינוס השקט כקריסה הזו, במרחק 10,300–8,100 ק"מ מן הבסיס — קריאה ראשונה, המסומנת בכתום במאמר 9 H§.

השאלה. האם האוקיינוס השקט אסימטרי ממזרח למערב סביב הבסיס, עם פסים מקבילים בצד הקדמי וקשתות מקומטות בצד האחורי?

מה המודל צופה. הגב של האגס קרס לתוך הקשתות של מערב האוקיינוס השקט, 10,300–8,100 ק"מ מן הבסיס (מאמר 9, B.8).

נתונים. בתימטריה; הגאומטריה של הקשתות.

שיטה. השוואה בין מזרח למערב סביב הבסיס: הצורה, המרווחים והכיוון של המבנים בכל צד, הנמדדים במרחקים מותאמים.

היכן בסדרה. מאמר 9 G§, מחקר 5; B.8; §H§; מאמר 1 D.1§.

85 מחקר הפסים 6 — רציפות מתחת לרכסים

קרקעית האוקיינוס השקט נחצית לא רק בפסים אלא גם בשרשראות של הרים תתי-ימיים ורכסים שחוצים אותם. מה בא קודם? אם הפסים הם קפל ישן יותר של הצד הקדמי, הם צריכים לעבור מתחת לרכסים בלי להישבר, על אותו מעגל משני הצדדים. מאמר 9 צפה בארבע חציות כאלה. הוא גם הציע מבחן של סדר: אם קפל נוצר מתחת לרכס שכבר עמד, הקרקע שמתחת לרכס נמשכה פנימה, והרכס צריך להיות מקוצר, דחוס או מכופף

במקום שבו הקפל עבר מתחתיו; אם הרכס לא נפגע, הוא בא מאוחר יותר. ההתכנסות של הפסים ממערב לרכסים היא קריאה ראשונה על מבטים אלכסוניים (כתום במאמר 9 H§); מבטים אלכסוניים מגזימים בגובה ומעוותים מרחקים, ולכן את המדידה יש לעשות על מפה שטוחה.

השאלה. האם כל פס ממשיך על אותו מעגל משני צדי הרכס, והאם הרכס מקוצר במקום שבו הקפל עבר מתחתיו?

מה המודל צופה. הפסים עוברים מתחת לרכסים (ארבע חציות נצפו) (מאמר 9, B.5–B.6, F.2).

נתונים. בתימטריה.

שיטה. מפה שטוחה בלי הגזמה אנכית, שבה הקואורדינטות של כל פס נקראות מן הסמן משני הצדדים של כל רכס; אורכו של כל רכס נמדד במקום שבו פס חוצה אותו.

היכן בסדרה. מאמר 9 G§, מחקר 6; B.5–B.6, F.2; מאמר 1 D.1§.

86 מחקר הפסים 7 — רכסי השפכטל מול רכסים שנבנו מלמטה

מרימים שפכטל מטיח רטוב, והטיח נמשך מעלה לרכסים מאחוריו. מאמר 9 קורא כך שלוש שרשראות באוקיינוס השקט — איי Line, שרשרת Marshall–Gilbert–Tuvalu ושרשרת Hawaii–Emperor: הן נמשכו מעלה מלמעלה על ידי הקצה שהורם, והמרווחים ביניהן הם כרוחב הקצה, 2,800–3,500 ק"מ זו מזו. במקומות אחרים בעולם יש רכסים שהספרות קוראת כבנויים מלמטה, על ידי מקור חום שעולה מתחת לקרקעית: Ninetyeast, Walvis ו-Chagos–Laccadive. שרשרת שנבנתה מלמטה מעל מקור קבוע מראה התקדמות גילים של פלומה (plume age progression): גילי הרי הגעש שלה עולים בהדרגה לאורכה. שרשראות Line ו-Marshall אינן מראות התקדמות כזו. Hawaii–Emperor כן מראה אחת, מ-0 מיליון שנה ב-Hawaii ועד כ-81 מיליון שנה בקצה הרחוק של שרשרת Emperor; המודל דורש שעל רכס שפכטל התקדמות כזו תהיה רצף מאוחר של התפרצויות על רכס שכבר עמד.

השאלה. האם השרשראות Line, Marshall–Gilbert–Tuvalu ו-Hawaii–Emperor שונות מ-Ninetyeast, Walvis ו-Chagos–Laccadive בגיל, בצורה, בתעלת הכפיפה, בשורש הקרום ובכיוון? כיצד מתיישבת התקדמות הגילים של Hawaii?

מה המודל צופה. השרשראות נמשכו מעלה מלמעלה על ידי הקצה שהורם, והמרווחים ביניהן הם כרוחב הקצה (2,800–3,500 ק"מ). Line ו-Marshall אינן מראות התקדמות גילים של פלומה (מאמר 9, D.1–D.4, F.3; ההשוואה כתומה ב-H§). תעלת כפיפה (flexural moat) היא השקע שנוצר סביב עומס כשהוא מכופף את הקרקעית שמתחתיו, ושורש קרום (crustal root) הוא הקרום המעובה שמתחתיו; רכס שנבנה מלמטה ורכס שנמשך מעלה מלמעלה צריכים להיות שונים בשניהם.

נתונים. גילים רדיומטריים; נתוני כבידה וכפיפה; מדידות סייסמיות של שורשי קרום.

שיטה. השוואה זה לצד זה של שש השרשראות בחמשת המדדים; גילי Hawaii נבחנו כהתפרצויות על רכס עומד.

היכן בסדרה. מאמר 9 G§, מחקר 7; D.1–D.4, F.3; מאמר 1 D.1§.

87 מחקר הפסים 8 — חותם המראה

כשהירח יושב על קצה האגס, הצד הקרוב שלו פנה אל כדור הארץ. שני הפנים עמדו זה מול זה, ולכן הצד הקרוב היה צריך להשאיר חותם על הקרקעית שמתחתיו כתמונת ראי — כמו חותמת שנלחצת בשעווה, מזרח ומערב מתחלפים בעוד שצפון נשאר צפון. החותם צריך גם להיות גדול מן הצד הקרוב של היום, פי 1.37: לירח הייתה אז

צפיפות של 1,300 ק"ג/מ"ק לעומת 3,344 היום, ואותה מסה הדחוסה לנפח קטן יותר מקצרת כל מרחק על פני שטחו באותו יחס. כש-Imbrium במקומו (13.19° צפון, 179.04° מזרח), המראה צופה את Serenitatis ליד 11.5° צפון, 166.3° מזרח, ואת מרכז המגע ליד 8.2° צפון, 179.3° מערב.

השאלה. האם נמצאים מבנים מעגליים על הקרקעית במקומות המשתקפים של Serenitatis, של Nectaris, של מרכז המגע ושל שאר הימות של הצד הקרוב, בקנה מידה 1:37?

מה המודל צופה. תמונת ראי של הצד הקרוב, כש-Imbrium במקומו (מאמר 9, C.3).

נתונים. בתימטריה; כבידה.

שיטה. המיקומים החזויים של כל ים בצד הקרוב מסומנים על המפה לפני הבדיקה, ואחר כך נבדקים לחיפוש מבנים מעגליים, מול מיקומי ביקורת אקראיים.

היכן בסדרה. מאמר 9, GS; מחקר 8; C.3§.

88 מחקר הפסים 9 — הפסים מתחת לשכבות המתוארכות

קרקעית האוקיינוס השקט מתוארכת לכל היותר לכ-180 מיליון שנה, בעוד שהאגס נפל חזרה בשחרור, לפני 3.873 מיליארד שנה. המודל מיישב בין השניים בעזרת העומק: קרקעית האוקיינוס המתוארכת היא השכבה האחרונה שהונחה על קפל ישן יותר. הפסים הם אז מבנה של השכבה שמתחת לפני השטח המתוארכים, תבליט שהשכבות החדשות התלבשו עליו ולא יצרו אותו. זוהי קריאה ראשונה (כתום במאמר 9, HS). היא נבדקת במקומות שבהם הפסים נחצים על ידי פרופילי החזרה סייסמית (seismic reflection profiles) — חתכים של הקרקעית שמתקבלים כששולחים גלי קול כלפי מטה ורושמים את ההדים שלהם מן השכבות שמתחת — ועל ידי קידוחים.

השאלה. האם הקפל ממשיך מתחת לשכבות הצעירות ביותר, עם שכבות דקות יותר מעל פסגותיו ושכבות עבות יותר בשקעיו?

מה המודל צופה. קרקעית האוקיינוס המתוארכת (לכל היותר כ-180 מיליון שנה) היא השכבה האחרונה שהונחה על קפל ישן יותר (מאמר 9, F.1).

נתונים. פרופילי החזרה סייסמית; קידוחים של Deep Sea Drilling Project ושל ממשיכיו (ODP, DSDP), (IODP).

שיטה. העובי של כל שכבה נמדד לרוחב הקפל, בפרופילים ובקידוחים שחוצים פס.

היכן בסדרה. מאמר 9, GS; מחקר 9; §HS; F.1; מאמר 1, D.1§.

89 האזור של האוקיינוס השקט כאגס שחזר (R11, R10)

כשהירח עזב את הקצה, שאר האגס — כתשע מסות ירח, שבע עד שתיים-עשרה בטווח של מאמר 9, כ-11% ממסת כדור הארץ — לא נותר לו דבר שיחזיק אותו בחוץ, והוא נפל חזרה בשלמותו. כולו היה בתוך רדיוס הקורטציה, ולכן שום חלק ממנו לא יכול היה להישאר במסלול (דרישה R10 של מאמר 11). החלק הכבד שלו שקע אל בסיס המעטפת מתחת לבסיס האגס. אנו מציעים — בהסתייגות, משום שטבעם של האזורים העמוקים עדיין פתוח, וייתכן שהאזור של האוקיינוס השקט הוא בחלקו חומר הקשור לליבה שלא סיים להתמיין — שהערימה החוזרת הזו היא האזור הגדול בעל המהירות הנמוכה (LLVP, large low-velocity province) של האוקיינוס השקט: אזור בגודל של יבשת בתחתית המעטפת, ממש מעל הליבה, שגלים סייסמיים עוברים בו לאט יותר מאשר במעטפת שסביבו (R11). האזור האפריקני, השני מבין השניים, נקרא כאונה הנגדית שלא הופרעה. המיקום עבר את המבחן: חמישה מתוך חמישה מודלים טומוגרפיים מסווגים את הנקודה שמתחת ל-Kiritimati

כאיטית, והיא נמצאת בתוך קו המתאר של 1% – של SMEAN ו-SMEAN2, ממוצעים של כמה מודלים של גלי גזירה, בעומק 2,800 ק"מ. מה שנותר הוא ההרכב, הצורה והאיזוטופים של הפלומות שעולות ממנו. גלים סייסמיים מאטים גם בחומר חם יותר וגם בחומר בעל הרכב שונה, ולכן המבחן חייב להגיע מעבר למהירות.

השאלה. האם האזור של האוקיינוס השקט עשיר יותר בברזל, צפוף יותר, נמוך יותר ורחב יותר מן האזור האפריקני? האם חלקו הצפוני הוא בסיס האגס? מה הקשר שלו לאזור בעל המהירות הנמוכה במיוחד שמתחת ל-Hawaii, כתם דק בבסיס המעטפת שבו הגלים מאטים הרבה יותר מאשר באזור שסביבו? האם הפלומות שעולות ממנו נושאות רק את החתימה של כדור הארץ?

מה המודל צופה. ערימה חוזרת עשירה בברזל מתחת לבסיס האגס; כתשע מסות ירח (שבע עד שתיים-עשרה) שחזרו בשלמותן, בלי שארית במסלול (R10); הבסיס מעל החלק הצפוני של האזור, כ-1,500 ק"מ צפונית למרכז (מאמרים 3 ו-11). פלומות מן האזור נושאות רק את החתימה של כדור הארץ.

נתונים. מודלים טומוגרפיים; אילוצים על הצפיפות מן המודים העצמיים של כדור הארץ (התנודות של כדור הארץ כולו שמעוררות רעידות אדמה גדולות); איזוטופים של בזלות פלומה (Xe, Ne, W, He).

שיטה. השוואה בין שני האזורים בצפיפות ובצורה; סקר איזוטופים של הפלומות של האוקיינוס השקט ושל האזור האפריקני.

היכן בסדרה. מאמר 3 E.1–E.4; מאמר 11 C.5, C.6 (R10, R11); מאמר 1 F.3; פריט 5; מאמר 1 D.1§ (השורה של מאמר 3 שממתינה).

90 שחזור מבני בלתי תלוי של הליתוספירה של האוקיינוס השקט

הסדרה ממקמת את אזור המקור על האוקיינוס השקט מתוך קריאת הירח: הבסיס ליד Kiritimati, גב האגס ליד 25° צפון, 165° מזרח, והקצה ב-9.3° צפון, 169.3° מזרח, כ-3,760 ק"מ ממערב לבסיס. הליתוספירה היא השכבה החיצונית הקשיחה של כדור הארץ, הקרום יחד עם החלק העליון והקר של המעטפת. שחזור של הליתוספירה של האוקיינוס השקט שנעשה בידי אחרים, מתוך המבנה שלה והרשומה המגנטית שלה ובלי המפה הירחית, הוא בדיקה בלתי תלויה: אם הוא ממקם את אזור המקור במקום שבו הסדרה קוראת אותו, ההתאמה אינה נובעת מן השיטה.

השאלה. האם שחזור של הליתוספירה שמתחת לאוקיינוס השקט, שנעשה בלי המפה הירחית, ממקם את אזור המקור במקום שבו הסדרה קוראת אותו?

מה המודל צופה. הבסיס ליד Kiritimati; גב האגס ליד 25° צפון, 165° מזרח; הקצה ב-9.3° צפון, 169.3° מזרח (מאמרים 3, 9 ו-11).

נתונים. שחזורים שפורסמו של הליתוספירה של האוקיינוס השקט; נתונים פליאומגנטיים (כיוון השדה המגנטי הקדום כפי שנרשם בקרקעית).

שיטה. שחזור בלתי תלוי, שנעשה בלי לראות את המפה הירחית ומושווה אליה לאחר מכן.

היכן בסדרה. מאמר 11, עבודה עתידית 7, C.2§.

תוצאה

חלק H בקצרה. את תשעת המחקרים של מאמר 9 (נושאים 80–88) אפשר לבצע כולם כבר עכשיו על בתימטריה, כבידה, רשתות גיל ורשומות קידוח ציבוריות; הם קובעים את קו המשווה של הפסים, בודקים את הבסיס מול המקריות, ובוחנים את הסדר בין הפסים, הרכסים והשכבות המתוארכות. הצד העמוק של החשבון — האזור של האוקיינוס השקט כאגס שחזר, קריאה שמוחזקת בהסתייגות כל עוד טבעם של

האזורים העמוקים פתוח — עבר את מבחן המיקום שלו וממתין להרכב ולאויזטופים של הפלומות (89);
שחזור בלתי תלוי של האזור סוגר את החלק (90).

חלק I — מאדים וגופים אחרים

מאמר 10 (Mars) עוקב אחרי הרעיון של הסדרה על כוכב לכת שני, בדרך אחרת. מאדים צעיר, שרדיוסו היה פי 1.5 מרדיוסו היום ושהסתובב פעם אחת בחמש שעות, ירה שני פקקים מן הקרום שלו עצמו מצינור געשי אחד ב-Pavonis Mons, בדחיפת גז כלוא. טבעת שמאדים בנה קודם לכן מאדי המים שלו עצמו נתנה לכל פקק את המהירות הצידיית שחסרה לו, עיגלה את מסלולו ומשכה אותו אל מישור קו המשווה, ואותו חיכוך שחק אותו. הגאות של מאדים הצעיר והרך דחפה אחר כך את שני הירחים החוצה: Deimos עבר את קו הקורוטציה הסופי — המרחק שבו גוף שמסתובב עם כוכב הלכת כבר נע במהירות של מסלול חופשי — והוא מתרחק; Phobos נתפס על ידי הקו הנע ומאז הוא נופל. החלק הזה חשוב למודל משום שזה המקום היחיד שבו אפשר לבחון על גוף שני ירח העשוי מפנים כוכב האם שלו, ומשום שמשימת MMX היפנית (Martian Moons eXploration) נוחתת על Phobos ב-2027, מחזירה את דגימותיו ב-2031 וחולפת קרוב ל-Deimos. חלק מן הנושאים שלהלן יוכרעו על ידי המשימה הזאת; האחרים הם חישובים או מדידות שאפשר לבצע כבר עכשיו, כך שהתחזיות ייקבעו לפני שהדגימות יגיעו.

הטבלה מפרטת את שישה-עשר הנושאים של החלק הזה. עמודת המוכנות משתמשת בשלושת הצבעים של המאמר כולו: ירוק — אפשר לבצע את העבודה כבר עכשיו על נתונים ציבוריים; כתום — נדרש מידול חדש; כחול — נדרשים משימה, דגימות או נתונים חדשים.

מס'	נושא	מוכנות
91	מאדים הצעיר, המורחב, בן חמש השעות, ואובדן הסיבוב שלו	מידול חדש
92	דחיפת הגז בצינור ארוך: הצעד המכריע	מידול חדש
93	הפקק הרך שאוטם: המחזור שבונה אותו	מידול חדש
94	הגרר בצינור והבלימה של Phobos	מידול חדש
95	הטבעת של אדי מים מעובים: מסה, מבנה וצימוד	מידול חדש
96	הטיפוס הגאותי של Deimos ומאדים צעיר ורך	מידול חדש
97	המרוץ של Phobos עם קו הקורוטציה	מידול חדש
98	הדגימות של MMX: חומר של מאדים, מקור אחד, שלפוחיות	נתונים חדשים
99	הגומות והחריצים של Phobos	נתונים ציבוריים
100	עומק השקעים על Deimos ועל Phobos	נתונים ציבוריים
101	מרכז המסה של Phobos	נתונים חדשים

102	ארבע הקלדרות של Tharsis וגירעון המסה מתחת ל-Pavonis	נתונים ציבוריים
103	רכיב עתיק באבק של מאדים	נתונים חדשים
104	צינור אחד על קו המשווה של מאדים, והמים מתחת ל-Tharsis (R18)	נתונים חדשים
105	הגופים האחרים: נוגה, כוכב חמה וכוכבי-על-ארץ מהירי-סיבוב	מידול חדש
106	הפרש הגבהים בין הקטבים ומהירות הסיבוב בהיווצרות	מידול חדש

רוב החלק הזה כתום: מאמר 10 מחשב את המהירויות, האנרגיות והמסלולים, ומשאיר את הדחיפה בצינור, את הטבעת ואת ההיסטוריה הגאותית של מאדים רך כחישובים שיש לבצע. שלושה נושאים אפשר להתחיל כבר עכשיו על מודלי צורה, תמונות וטופוגרפיה ציבוריים; ארבעה ממתנים ל-MMX ולמשימות אחרות. הנושא האחרון שואל אם הפרש הגבהים בין הקטבים של גוף גדל עם מהירות הסיבוב שלו בזמן היווצרותו.

91 מאדים הצעיר, המורחב, בן חמש השעות, ואובדן הסיבוב שלו

מאמר 10 מניח שמאדים הצעיר היה ברדיוס של פי 1.5 מרדיוסו היום, 5,084 ק"מ, עם יום של חמש שעות. בקו המשווה שלו כל דבר שיצא נשא מהירות צידית חופשית של 1.78 ק"מ/ש', הכבידה האפקטיבית הייתה 1.04 מ"ש², כרבע מזו של היום, וקו הקורוטציה עמד ב-7,057 ק"מ, פחות מ-2,000 ק"מ מעל הקרקע. כוכב לכת כזה מחזיק פי 12 בערך מן הסיבוב של מאדים היום; כדי להגיע למצבו הנוכחי הוא חייב היה לאבד כ-92% ממנו, ברובו עם חומרים נדיפים שיצאו דרך קו הקורוטציה.

השאלה. האם מאדים צעיר, חם ועשיר בחומרים נדיפים, עקבי בפני עצמו, יכול להיות בעל הרדיוס והסיבוב האלה, והאם הוא יכול לאבד כ-92% מן הסיבוב שלו בהשלט 5–20% מן המסה שלו דרך הקו?

מה המודל צופה. רדיוס של כפי 1.5 מזה של היום ויום של חמש שעות; אובדן של 5–20% מן המסה ההתחלתית, ברובה חומרים נדיפים, והערכ הנמוך אם הצפיפות עלתה לעבר המרכז (מאמר 10).

נתונים. מודלים של פנים מאדים, מאולצים על ידי InSight; מודלים של אובדן חומרים נדיפים מוקדם ושל ההעשרה בדאטריום של המים של מאדים.

שיטה. מודל מצומד של ההתכווצות התרמית, אובדן החומרים הנדיפים והסיבוב של מאדים הצעיר, כשהתנע הזוויתי נישא על ידי מסה שיוצאת דרך קו הקורוטציה.

היכן בסדרה. מאמר 10 §H.3, B.1–B.4, חלק O פריט 1.

92 דחיפת הגז בצינור ארוך: הצעד המכריע

פיצוץ געשי חופשי מוגבל לכ-1 ק"מ/ש'. מאמר 10 דורש 2.4–2.9 ק"מ/ש', ומשיג זאת מגז כלוא שדוחף פקק אוטם לאורך מסלול סגור, כמו בתותח גז, שהגבול שלו הוא כ-6.3 ק"מ/ש'. לאורך מסלול של 200–300 ק"מ הלחץ הממוצע הנדרש הוא 0.25–0.47 ג'יגה-פסקל, בסדר גודל של לחץ הכליאה של החומר הסובב בעומק הזה, 0.26–0.39 ג'יגה-פסקל, ולכן הדפנות מחזיקות. האנרגיה היא 1.3×10^{22} ג'אול ל-Deimos ו- 3.6×10^{22} ג'אול ל-Phobos, עם 10^{16} – 3×10^{16} ק"ג של אדי מים. מאמר 10 מציין זאת כצעד המכריע של התיאור שלו.

השאלה. האם גז כלוא בתא עמוק יכול לדחוף פקק של קרום לאורך צינור של 200–300 ק"מ עד 2.4–2.9 ק"מ/ש', בלי לפרוץ את הדפנות ובלי לעקוף את הפקק?

מה המודל צופה. לחץ דחיפה ממוצע של 0.25–0.5 ג'יגה-פסקל, שמאוזן על ידי לחץ הכליאה לאורך המסלול; מסת גז של פי אחד עד שלושה ממסת הפקק (מאמר 10).

נתונים. הראולוגיה והחוזק של הקרום והמעטפת של מאדים בעומק; תכולת החומרים הנדיפים במאגמות של מאדים.

שיטה. מודל חד-ממדי ואחר כך דו-ממדי של פקק המונע בגז בצינור בר-עיוות, שבו התפשטות הגז, המאמץ בדפנות והדליפה סביב הפקק מחושבים יחד.

היכן בסדרה. מאמר 10 §C.3, §C.6, §C.8; חלק O פריט 3.

93 הפקק הרך שאוטם: המחזור שבונה אותו

במאמר 10 הפקק אינו גוש קשיח אלא גוף חם בעל צמיגות גבוהה, שאוטם את הצינור כמו פקק גומי, כמה קילומטרים מתחת לפי הפתח. הוא נבנה במחזור וולקני (Clarke ועמיתיו 2015, *The Encyclopedia of Volcanoes*, מהדורה 2): גז משתחרר, הפתח נח, הפקק מתקרר ואוטם, לחץ מתון אינו מצליח לפתוח אותו, וגז מצטבר מתחתיו עד שהוא נכנע. סימני הפגיעה על שני הירחים, המקופלים פנימה, נקראים כסימנים שנעשו על גופים חמים ופלסטיים.

השאלה. באיזה תחום של צמיגות וטמפרטורה פקק של קרום מאדים אוטם צינור מול 0.25–0.5 ג'יגה-פסקל, ואחר כך יוצא כגוף אחד ואינו מתפורר?

מה המודל צופה. פקק רך ואוטם שיוצא שלם; הפקק הראשון קטן, קל ורטוב, והשני גדול יותר, יבש יותר וקשה יותר (מאמר 10).

נתונים. נתוני צמיגות וכשל של מאגמות עשירות בגבישים ונושאות חומרים נדיפים; רצפים וולקניים בכדור הארץ.

שיטה. מודל של ההתקררות, האיטום והכשל של פקק צמיג בצינור, שמורץ דרך מחזורים חוזרים.

היכן בסדרה. מאמר 10 §D.4, §C.4–C.5.

94 הגרר בצינור והבלימה של Phobos

פקק שנע במעלה צינור על כוכב לכת מסתובב נלחץ הצידה על ידי אפקט קוריוליס, 2ω , כ-1.8–2.0 מ'ש², אל הדופן המערבית. מאמר 10 קורא את החריצים של Phobos כשריטות של הדופן הזאת, ואת הבלימה של הירייה השנייה כאותו מגע. הפקק הראשון, Deimos, יצא בלי להיגרר.

השאלה. כמה מהירות וכמה מסה מאבד פקק מול הדופן של צינור, והאם השריטות מרוכזות בצד שפנה מערבה?

מה המודל צופה. Phobos נבלם ל-2.4–2.6 ק"מ/ש' ואיבד כ-1% מן המסה שלו; החריצים שלו מרוכזים בצד שפנה מערבה (מאמר 10).

נתונים. מפות החריצים של Phobos; מודל הצורה.

שיטה. מודל מגע וחיכוך של פקק צמיג בצינור מסתובב; מבחן של כיוון החריצים מול הצד המערבי הצפוי.

היכן בסדרה. מאמר 10 §K.1, §G.3, §C.7.

95 הטבעת של אדי מים מעובים: מסה, מבנה וצימוד

פקק שנורה מפני השטח מגיע לגובה הטבעת אבל לא למסלול שלה, ולבדו הוא נופל בחזרה בתוך הקפה אחת. במאמר 10 המהירות החסרה באה מטבעת שמאדים בנה מוקדם מאדי המים שלו עצמו: מרווח צלול וחם קרוב לכוכב הלכת, גבישי קרח ואבק גבוה יותר, וגושים מעבר לכ-13,000 ק"מ, גבול רוש לקרח. כדי לתת לגוף את המהירות החסרה לו בשיתוף מושלם של תנע, הטבעת צריכה למסור לפחות כ-0.6 ממסת הגוף; צימוד ממשי דורש כמה מונים מזה, בסדר גודל של 10^{16} ק"ג. התיאור עומד או נופל עם הטבעת.

השאלה. האם מאדים צעיר יכול לבנות טבעת כזאת ולשמור עליה, והאם גוף שחוצה אותה מקבל את מסלולו, מעגל אותו ומושך אותו אל מישור קו המשווה לפני שהוא נשחק?

מה המודל צופה. טבעת בסדר גודל של 10^{16} ק"ג; Deimos נשחק ב-30–60% מן המסה שלו, ברובה בטבעת החיצונית רבת הגושים; Phobos, בשולה הדק של טבעת דועכת, בכ-1% (מאמר 10).

נתונים. מודלים של דיסקות סביב כוכבי לכת ושל האטמוספירה והמים המוקדמים של מאדים.

שיטה. סימולציות N גופים או סימולציה הידרודינמית של פקק שחוצה טבעת של אדי מים מעובים, עם גר, שחיקה וריסון המסלול אל מישור קו המשווה.

היכן בסדרה. מאמר 10 §H.1, §F.1–F.3, E.2; חלק O פריט 4.

96 הטיפוס הגאותי של Deimos ומאדים צעיר ורך

מעבר לקו הקורטציה הגאות דוחפת ירח החוצה. מאמר 10 מעביר את Deimos מן הטבעת, כ-15,000 ק"מ, אל מקומו היום, 23,463 ק"מ, מעבר לקו של היום, 20,428 ק"מ, לפני שהקו הגיע לשם. עם הנוסחה $da/dt = 3 (k_2/Q) (m/M) (R/a)^5 na$, הדבר דורש מאדים צעיר שמפזר פי 8 עד 20 יותר מהיום, במשך חצי מיליארד עד מיליארד שנה. רוב הזמן מושקע בחלק החיצוני של הטיפוס.

השאלה. איזו היסטוריה של k_2/Q למאדים חם, רך ומהיר מעבירה את Deimos ל-23,463 ק"מ לפני שקו הקורטציה מגיע ל-20,428 ק"מ, בהינתן מסת היציאה הגדולה יותר שלו?

מה המודל צופה. פיזור של פי 8–20 מזה של היום במשך 0.5–1 מיליארד שנה (מאמר 10).

נתונים. המסלול הנוכחי של Deimos; מודלים של הפיזור בכוכב לכת מותך בחלקו.

שיטה. אינטגרציה מצומדת של הסיבוב של מאדים, הפיזור שלו והמסלול של Deimos.

היכן בסדרה. מאמר 10 §J.1, G.2; חלק O פריט 2.

97 המרוץ של Phobos עם קו הקורטציה

Phobos נורה חלש יותר והגיע רק ל-10,000–11,000 ק"מ. מחוץ לקו של זמנו הוא נדחף החוצה על ידי הגאות, אבל הקו נע החוצה מהר יותר ככל שמאדים האט, ותפס אותו ליד 19,000 ק"מ, כשהיום היה כ-22 שעות. מאז Phobos נמצא בתוך הקו והתחיל ליפול. הרצת הנפילה שלו לאחר בפיזור של היום, $k_2/Q = 1.816 \times 10^{-3}$, ממקמת אותו ב-19,100–19,500 ק"מ לפני 3.9–4.5 מיליארד שנה, בהתאמה ל-Cheng ועמיתיו (2022, *Planet. Sci. J.* 3). הנטייה שלו ירדה מ- 1.48° ל- 1.09° של היום.

השאלה. האם היסטוריה אחת של הסיבוב של מאדים ושל הפיזור שלו נותנת גם את הדחיפה של Phobos החוצה וגם את התנועה המהירה יותר של הקו החוצה, כך שהקו תופס את Phobos ליד 19,000 ק"מ?

מה המודל צופה. הקו תופס את Phobos ליד 19,000 ק"מ, ביום של כ-22 שעות; הנטייה יורדת מ- 1.48° ל- 1.09° (מאמר 10).

נתונים. המסלול והנטייה הנוכחיים של Phobos; הפיזור הנמדד של מאדים.

שיטה. אותה אינטגרציה מצומדת כמו בנושא 96, מורצת עבור Phobos, כולל ריסון הנטייה.

היכן בסדרה. מאמר 10 §K.4–K.5, G.3; חלק O פריט 5.

98 הדגימות של MMX: חומר של מאדים, מקור אחד, שלפוחיות

MMX תחזיר יותר מ-10 גרם של רגולית מ-Phobos ב-2031. במודל Phobos הוא קרום של מאדים שעבר שינוי במים, ממקור אחד, שמעולם לא הותך ולא התעבה מחדש.

השאלה. האם Phobos הוא קרום של מאדים ממקור אחד, או תערובת של מאדים ושל גוף פוגע, או חומר אסטרואידי קדום?

מה המודל צופה. איזוטופים של חמצן, כרום וטיטניום על הקו של מאדים; אין רכיב של גוף פוגע; איזוטופים של אבץ ואשלגן שלא הוסטו על ידי אידוי; מינרלים הידרטיים (נושאי מים); שלפוחיות סגורות של קצף שהתקרר (מאמר 10, N.1).

נתונים. הדגימות של MMX (2031).

שיטה. ניתוח איזוטופי ומרקמי של הגרגרים שיוחזרו.

היכן בסדרה. מאמר 10 §N, נספח B.

99 הגומות והחריצים של Phobos

במודל החריצים ושרשראות הגומות של Phobos הם מבנה אחד, שנוצר בצינור, והחריצים נחרטו על ידי אבק שנישא בגז, ולא הוחלקו על ידי מים.

השאלה. האם גומות חוצות אי פעם חריצים? האם דפנות החריצים בצורת V, והשפות חדות או שחוקות רק מעט?

מה המודל צופה. גומות לעולם אינן חוצות חריצים; דפנות חריצים בצורת V; שפות חדות או שחוקות מעט, בשונה מפני השטח המעוגלים של Deimos (מאמר 10, N.2).

נתונים. תמונות ומודלי צורה קיימים של Phobos; הדמיה של MMX מ-2027.

שיטה. מיפוי שרשראות הגומות מול החריצים; חתכים לרוחב דפנות החריצים ושפותיהם.

היכן בסדרה. מאמר 10 §N, K.1–K.3.

100 עומק השקעים על Deimos ועל Phobos

מודלי הצורה שנמדדו עבור מאמר 10 (Ernst ועמיתיו 2023, *Earth, Planets and Space* 75) נותנים יחס חציוני בין עומק לרוחב של השקעים של 1.9% על Deimos לעומת 5.5% על Phobos: Deimos נשחק הרבה יותר. לשני הירחים יש קצה חד וקצה קהה, והקצה הקהה פונה אל מאדים.

השאלה. האם קטלוג מלא של השקעים על שני הירחים מאשר את הניגוד, והאם הוא מראה שהשפות של Deimos שחוקות ולא קבורות?

מה המודל צופה. שקעים רדודים ושחוקים על Deimos; עמוקים יותר על Phobos; רכסים נמוכים על Deimos שהם השורשים של הקמטים הגבוהים ביותר שלו (מאמר 10, N.3).

נתונים. מודלי צורה ציבוריים של שני הירחים; המעברים של MMX ליד Deimos.

שיטה. מדידה אוטומטית וידנית של העומק, הרוחב וחתך השפה של כל שקע מעל סף גודל.

היכן בסדרה. מאמר 10 §J.1–J.2.

101 מרכז המסה של Phobos

פקק שהתקרר מפני השטח שלו וסובב על ידי הגאות כך שיפנה אל מאדים בקצהו הקהה אינו חייב להיות אחיד.

השאלה. האם מרכז המסה של Phobos מוסט ממרכז הצורה שלו לעבר מאדים, לעבר הקצה הקהה שלו?

מה המודל צופה. היסט לעבר מאדים ולעבר הקצה הקהה; ההסברים המקובלים אינם נותנים תחזית (מאמר 10, N.5).

נתונים. המעקב של MMX בקרבת Phobos.

שיטה. היפוך של שדה הכבידה, בהשוואה למודל הצורה.

היכן בסדרה. מאמר 10 §N; נספח B.

102 ארבע הקלדרות של Tharsis וגירעון המסה מתחת ל-Pavonis

בור הפסגה של Pavonis הוא עיגול יחיד ברוחב 47 ק"מ ובעומק של כמעט 5 ק"מ, יחס עומק לרוחב של כ-0.10, ובנפח של 8,300–8,700 קמ"ק, בסדר הגודל של שני הירחים יחד, 6,740 קמ"ק. במודל זו התקרה של תא שקרס אחרי היריות.

השאלה. האם Pavonis היא הקלדרה העמוקה ביותר ביחס לרוחבה מבין ארבעת הרי הגעש של Tharsis, והאם יש מתחתיה גירעון מסה?

מה המודל צופה. העמוקה ביותר ביחס לרוחבה (כ-0.10); גירעון מסה מתחתיה (מאמר 10, N.4).

נתונים. הטופוגרפיה של MOLA; מודלי הכבידה של מאדים.

שיטה. עומק ורוחב של כל קלדרה מתוך MOLA; היפוך כבידה מקומי מתחת לכל אחת.

היכן בסדרה. מאמר 10 §N.1–I.3.

103 רכיב עתיק באבק של מאדים

במודל החלק הפנימי של הטבעת נפל בחזרה על מאדים כאבק, ברובו ליד קו המשווה. הגרגרים שלו שהו זמן מה בחלל, ולכן הם אמורים לשאת גזים של רוח השמש.

השאלה. האם האבק של מאדים מכיל רכיב עתיק מ-4 מיליארד שנה, שגרגריו נושאים הליום ונאון של רוח השמש ואת ההרכב של הרגולית של Phobos?

מה המודל צופה. רכיב כזה, השכיח ביותר ברצועה המשוונית הרחבה וביבשות האבק (Arabia Terra, Tharsis), מעורב בחומר שנשחק על ידי בצורת ורוח (מאמר 10, N.7).

נתונים. דגימות הרגולית של Perseverance שיוחזרו; הדגימות של MMX מ-Phobos להשוואה.

שיטה. תיארוך גרגר אחר גרגר וניתוח של גזים אצילים; השוואה ל-Phobos.

היכן בסדרה. מאמר 10 §H.1; נספח B.

104 צינור אחד על קו המשווה של מאדים, והמים מתחת ל-Tharsis (R18)

גוף מתחיל במסלול הנוטה בזווית של קו הרוחב של אתר השיגור שלו. Pavonis, ב- 1.48° צפון, הוא הקרוב ביותר לקו המשווה מבין ארבעת הרי הגעש של Tharsis; Olympus, ב- 18.65° צפון, היה מתחיל ירח במסלול הנוטה בכ- 19° . שני הירחים מקיפים בטווח 2° מקו המשווה. דרישה R18 של מאמר 11 (The Requirements) קובעת ששניהם נורו מן הצינור האחד הזה. המים שלא יצאו נשארו אטומים מתחת לקרום, במקום שבו InSight מצאה קרום אמצעי רווי מים.

השאלה. האם שני הירחים הם חומר של מאדים מצינור משווי אחד, והאם קרום אמצעי רווי מים נמצא גם מתחת ל-Tharsis?

מה המודל צופה. מקור אחד לשני הירחים, ו-Deimos הרטוב מביניהם; קרום אמצעי רווי מים מתחת ל-Tharsis כמו מתחת ל-InSight (מאמר 10, N.5–N.6; מאמר 11, R18).

נתונים. הדגימות של MMX והמעברים ליד Deimos; תחנות סייסמיות עתידיות על Tharsis.

שיטה. השוואה של ההרכב של שני הירחים; גישוש סייסמי של הקרום של Tharsis.

היכן בסדרה. מאמר 10 SM§, §H.2, D.1–D.4; מאמר 11 § (R18) C.7.

105 הגופים האחרים: נוגה, כוכב חמה וכוכבי-על-ארץ מהירי-סיבוב

המנגנון זקוק לסיבוב מהיר: רדיוס הקורטציה חייב להיות קרוב מספיק לפני השטח כדי שהלחץ של כוכב הלכת עצמו ירים אליו חומר. נוגה מסתובב פעם אחת ב-243 ימים, וכוכב חמה פעם אחת ב-59 ימים; רדיוסי הקורטציה שלהם רחוקים מאוד, ושום דבר אינו מורם. לשניהם אין ירחים, כפי שהמודל מצפה. כוכב-על-ארץ מסיבי ומהיר-סיבוב הוא המקרה ההפוך. מחקר פרמטרים על פני הסיבוב, המסה ותכולת החומרים הנדיפים יהפוך זאת לתחזית לגבי הירחים של כוכבי לכת אחרים.

השאלה. מה צופה מחקר פרמטרים בסיבוב, במסה ובתכולת החומרים הנדיפים לגבי הירחים של כוכבי לכת אחרים?

מה המודל צופה. שום דבר אינו מורם בגופים שמסתובבים לאט (נוגה, 243 ימים; כוכב חמה, 59 ימים); יותר מורם בכוכב-על-ארץ מהיר-סיבוב (מאמר 1).

נתונים. רשימות הלוויינים של כוכבי הלכת; הסיבובים והמסות של כוכבי לכת מחוץ למערכת השמש.

שיטה. מבחני הקורטציה והלחץ של הסדרה, מוחלים על פני מרחב הפרמטרים.

היכן בסדרה. מאמר 1 F.3§ פריט 9; מאמר 10 B§ (התפקיד של סיבוב מהיר).

106 הפרש הגבהים בין שני הקטבים ומהירות הסיבוב בזמן ההיווצרות

במאדים שני הקטבים אינם עומדים באותו גובה. מד הגובה בלייזר של Mars Global Surveyor (MOLA) מראה שאזור הקוטב הצפוני נמוך בכמה קילומטרים מן הדרומי. ההפרש הוא חלק מן הדיכוטומיה של מאדים — הניגוד בין המישורים הצפוניים, הנמוכים והחלקים, לבין הרמות הדרומיות, הגבוהות ורבות המכתשים — ובספרות יש לו הסברים אחרים, ביניהם פגיעה ענקית וזרימה חד-צדדית במעטפת. ההצעה של המחבר קושרת את ההפרש לסיבוב: ככל שהגוף הסתובב מהר יותר כשנוצר, כך ההפרש בין הקטבים שלו צריך להיות גדול יותר. בסדרה, מהירות הסיבוב היא שקובעת כמה קרוב לפני השטח נמצא רדיוס הקורטציה וכמה חומר גוף צעיר יכול להרים (מאמרים 2, 10); הנושא שואל אם אותו גודל משאיר את סימנו גם בגובה הקטבים. ההשערה עוד לא נבדקה.

השאלה. האם הפרש הגבהים בין הקוטב הצפוני לדרומי של גוף גדל עם מהירות הסיבוב של הגוף בזמן היווצרותו?

מה המודל צופה. ככל שהסיבוב בזמן היווצרות מהיר יותר, ההפרש בין הקטבים גדול יותר. זו השערה לבדיקה, ולא תוצאה של הסדרה.

נתונים. הטופוגרפיה של הקטבים ממדידות גובה מהמסלול: MOLA למאדים (Smith ועמיתיו 1999, *Science* 284), LOLA לירח, והנתונים המקבילים לגופים האחרים שהטופוגרפיה שלהם נמדדה; הסיבוב של מאדים הצעיר ממאמר 10 (B.1–B.2§§), ומהירויות הסיבוב של הסדרה לכדור הארץ ולירח.

שיטה. ראשית, שלב של מידול: הסיבוב לבדו פוחס גוף באותה מידה בשני הקטבים, ולכן החישוב צריך לזהות את הרכיב החד-צדדי שהופך סיבוב מהיר יותר להפרש גדול יותר בין הקטבים, ולגזור ממנו את הקשר. שנית, השוואה: ההפרש בין הקטבים נמדד על הקרקע שמתחת לכיפות הקרח הקוטביות, שבמאדים עוביין קילומטרים, ביחס למשטח השווה-פוטנציאל של כל גוף, ומושווה למהירות הסיבוב בזמן היווצרות. במאדים ייתכן שהקטבים של היום אינם הקטבים של זמן היווצרות, כי עומס גדול כמו Tharsis יכול לסובב את כוכב הלכת מתחת לציר הסיבוב שלו; ההשוואה צריכה להביא זאת בחשבון.

היכן בסדרה. עדיין לא בסדרה; עלה ברשימות העבודה של המחבר (האוסף מ-16.10.2026). קשור: נושאים 104 (צינור אחד על קו המשווה של מאדים, ו-Tharsis), 105 (הגופים האחרים וכוכבי-על-ארץ מהירי-סיבוב) ו-115 (אסימטריה צפון-דרום כש-South Pole–Aitken מוסר).

חלק J — הדרישות ומבחני המפתח

מאמר 11 מעמיד את המודל מול מה שעליו לקיים: שמונה-עשרה דרישות (R1–R18), כל אחת מותאמת למדידה שבודקת אותה. החלק הזה אוסף את הנושאים שנותרו שם פתוחים. לשניים מהם משקל גדול יותר מלכל נושא אחר במאמר הזה. הראשון הוא הגאומטריה של החשיפה (נושאים 107 ו-108): הירח צריך להיות מסודר בשלושה אזורים סביב מרכז אחד בצד הקרוב, כשהקרום הדק ביותר והמכתשים המעטים ביותר נמצאים במקום שבו המגע עם כדור הארץ נחשף אחרון. השני הוא מקור המכתשים (נושא 109): במודל הם נוצרו על ידי חומר ארצי חוזר, ולא על ידי גופים מבחוץ. שאר הנושאים הם המאזנים — איזוטופים, מתכת, קרום, גילים וחומרים נדיפים — שהמודל צריך לסגור בסט אחד של מספרים. שלושה נושאים חותמים את החלק: ממה עשויה ליבת הירח, האם הליבה מוסטת לכיוון כדור הארץ, והאם יש בקרום מקום דק שאף אגן ואף פתח אינם מסבירים.

מס'	נושא	מוכנות
107	הרצה חוזרת של מבחן עובי הקרום T1 על הגאומטריה הנוכחית, בכל ארבעת מודלי GRAIL	נתונים ציבוריים
108	השלמת הסטטיסטיקה של החגורות: T2 לפי גיל, T3, T4, GRGM1200B	נתונים ציבוריים
109	אין חומר זר: ההכרעה האיזוטופית (R14)	נתונים חדשים
110	מאזן איזוטופים רב-מערכתי (R1)	מידול חדש
111	תקציב המתכת: הגלעין כמד (R2, R13)	מידול חדש
112	הפתרון המשותף של הקרום ומרכז המסה (R3, R7)	מידול חדש
113	שני קרומים, שני גילים (R5)	נתונים חדשים
114	חומרים נדיפים בכמות ובפאזה שההזנה צריכה (R6)	מידול חדש
115	אסימטריה צפון-דרום כש-South Pole–Aitken מוסר	נתונים ציבוריים
116	ההרכב של ליבת הירח	נתונים חדשים
117	היסט הליבה כשארית של היסט מרכז המסה	מידול חדש
118	מינימום יתום בעובי הקרום	נתונים ציבוריים

שני הנושאים של אזורי החשיפה ירוקים: הנתונים הציבוריים והמבחנים נקבעו מראש, ולכן אפשר להשלים אותם כבר עכשיו. ההכרעה האיזוטופית ממתינה לאנליזות מעבדה של דגימות שכבר קיימות, וההרכב של הליבה — לנתונים סייסמיים ומעבדתיים חדשים; היסט הליבה הוא חישוב משותף, ואת הסריקה אחר מינימום יתום אפשר לבצע כבר עכשיו.

107 הרצה חוזרת של מבחן עובי הקרום T1 על הגאומטריה הנוכחית, בכל ארבעת מודלי

GRAIL

GRAIL, החללית התאומה שמיפתה את הכבידה של הירח, נתנה ארבעה מודלים סטנדרטיים של עובי הקרום הירחי (מודלים 1–4, הנבדלים בצפיפות ובנקוביות שהונחו). המודל דורש שהקרום יהיה הדק ביותר מעל המגע — האזור שהיה מחובר לכדור הארץ ונחשף אחרון — עבה יותר בחגורה שסביבו, והעבה ביותר בצד הרחוק, שפני השטח שלו היו חשופים מן ההתחלה. מבחן T1 מודד את הסידור הזה ואת הניגוד בין הרחוק למגע. החיזוי הוא הסידור; גודל הניגוד הוא מספר לכיול. בספטמבר 2026 הורץ המבחן סביב הציר הפונה לכדור הארץ: הסידור התקיים בכל ארבעת המודלים, בניגודים של 9.65, 10.0, 10.3 ו-10.6 ק"מ. מאז קבע מאמר 3 (LEF Mechanism in Practice) את הגאומטריה הנוכחית: מרכז המגע ב- 24.1° צפון 335.2° מזרח, אזור המגע 0° – 31° , החגורה 31° – 70° והחלק הרחוק 70° – 180° . עליה מודל 1 נותן 26.3, 30.3 ו-36.2 ק"מ כשהימות נשארים (ניגוד של 9.9 ק"מ), ו-31.3, 33.0 ו-38.9 ק"מ כשהימות ו-SPA מוסרים (ניגוד של 7.5 ק"מ). מודלים 2–4 לא הורצו על הגאומטריה הנוכחית. המחבר הכריע ב-15.10.2026 שההרצה החוזרת הזאת נשארת לחוקרים אחרים. ההשוואה חייבת להיות שווה מול שווה: כל מה שממוסך (ימות, SPA) ממוסך בכל האזורים.

השאלה. עם רשתות GRAIL המלאות לכל ארבעת המודלים, על הגאומטריה הנוכחית, האם הסידור מגע > חגורה > רחוק מתקיים, ומה גודל הניגוד בין הרחוק למגע, כמספר לכיול?

מה המודל צופה. הקרום מתעבה באופן מונוטוני מאזור המגע אל החגורה ואל הצד הרחוק. הסידור מתקיים בכל ארבעת המודלים (מתאם דרגות $+0.87$). הניגוד על הגאומטריה של ספטמבר הוא 9.65 / 10.0 / 10.3 / 10.6 ק"מ; על הגאומטריה הנוכחית מודל 1 נותן ניגוד של 9.9 ק"מ (7.5 ק"מ כשהימות ו-SPA מוסרים); מודלים 2–4 נשארים להרצה החוזרת (מאמר 11).

נתונים. ארבעת מודלי עובי הקרום של GRAIL (Wieczorek et al. 2013) ברזולוציה מלאה.

שיטה. ממוצעי חגורות לפי המרחק הזוויתי ממרכז המגע, עם אזורים שנקבעו מראש, ואותה מסכה בכל האזורים.

היכן בסדרה. מאמר 11 §B.9, B.8, פריט עבודה עתידית 1 §D.3 (R8); מאמר 1 §E.2, D.1.

108 השלמת הסטטיסטיקה של החגורות: T2 לפי גיל, T3, T4, GRGM1200B

T1 הוא אחד מחמישה מבחנים של אזורי החשיפה שנקבעו במאמר 11. T5, מגמת העובי בשתיים-עשרה חגורות, עבר עם $+0.87$ בכל מודל; T2, צפיפות המכתשים של 20 ק"מ ומעלה, עבר (רחוק/שוליים 1.34). נותרו שלושה צעדים. יש לחזור על T2 על המכתשים העתיקים ביותר, שנבחרו לפי גיל (דרגת בלייה), משום שרישום החשיפה נשמר בהם. T3 שואל היכן נמצאים אגני המסקון הגדולים בעלי הטבעות (מסקון הוא ריכוז מסה מתחת לאגן, הנראה בשדה הכבידה); T4 שואל את אותה שאלה על המסקונים החזקים ביותר שאין להם טבעות. לבסוף יש לבדוק את הסידור על רשתות כבידה שאינן תלויות במודל קרום: שדה Bouguer (הכבידה לאחר הסרת המשיכה של הטופוגרפיה), רשתות הצפיפות הרחובית והשדה החדש יותר GRGM1200B.

השאלה. האם אוכלוסיית המכתשים העתיקה ביותר מסודרת לפי חגורות כשהיא נבחרת לפי גיל? האם לפחות 60% מאגני המסקון בעלי הטבעות נמצאים ב- 41° – 105° (T3)? האם לפחות 70% מעשרת המסקונים החזקים ביותר ללא טבעות נמצאים בתוך 50° (T4)? האם הסידור מתקיים על רשתות Bouguer ועל רשתות הצפיפות הרחובית?

מה המודל צופה. שלושה אזורים קונצנטריים סביב המרכז שבצד הקרוב, ושום ציר אחר (מאמרים 3 ו-11). T5 (+0.87) ו-T2 (1.34) עברו; T3 ו-T4 לא הורצו.

נתונים. קטלוג המכתשים של Robbins (2019) עם דרגות הבלייה; גרדיאנטי הכבידה של GRAIL; GRGM1200B.

שיטה. כמו במאמר B.8§ 11, עם ספים שנקבעים לפני שבוחנים את הנתונים.

היכן בסדרה. מאמר B.8 (T2–T5)§ 11, פריט עבודה עתידית 1; מאמר D.1§ 3; מאמר F.3§ 1, פריט E.2, § 1, SD.1.

109 אין חומר זר: ההכרעה האיזוטופית (R14)

במודל כ-99% מהמכתשים הירחיים נוצרו על ידי חומר ארצי חוזר: חומר שהורם מכדור הארץ וירד בחזרה אל הירח. הקריאה המקובלת היא ההפוכה — שהמכתשים נוצרו על ידי אסטרואידים ושביטים. שתי הקריאות נבדלות בחומר שנשאר אחריהן. יסודות שנוצרו בחלקים שונים של מערכת השמש הקדומה נושאים דפוסים איזוטופיים נוקלאוסינתטיים שונים — הבדלים קטנים ביחסים בין האיזוטופים של כרום, טיטניום, מוליבדן, רותניום ואוסמיום, שפועלים כטביעת אצבע של המוצא. מתכת שהייתה בתוך הדגימות העתיקות כשהן נוצרו חייבת לשאת את טביעת האצבע של מה שיצר אותן. המודל מעלה גם טיעון מסה: אם המכתשים הנראים נוצרו על ידי גופים מבחוץ, 5 הק"מ העליונים של הקרום היו צריכים להכיל 4.4×10^{19} ק"ג של מסה זרה, 2%–6%, ואילו התכולה הנמדדת היא לכל היותר 0.9%–2%, והרותניום שנמדד עד כה הוא ארצי. אבק חלל דק ברגולית מותר במודל; הוא אינו החומר של המכתשים.

השאלה. האם המתכת שהייתה חלק מן הדגימות העתיקות כשנוצרו — הברזל-ניקל של שני הנורטים המתוארכים של Chang'e-6, והיסודות הסידרופיליים (יסודות שהולכים עם הברזל) בהתכים של כל אגן של הימות — נושאת חתימה איזוטופית ארצית או לא-ארצית (Cr, Ti, Mo, Ru, Os)?

מה המודל צופה. כ-99% מהמכתשים עשויים מחומר ארצי חוזר (מאמרים 1, 5, 6, 8, 11). המתכת של הנורטים ארצית (מאמר 8, B14, מתאים בחלקו; האיזוטופים מכריעים).

נתונים. הנורטים של Chang'e-6 CE6C0100YJFM002-158 ו-CE6C0200YJFM001EGP07-16; התכים מאתרי מכתשים של Apollo ו-Chang'e; בזלות הפלומות של האוקיינוס השקט, כייחוס הארצי.

שיטה. אנליזות איזוטופים נוקלאוסינתטיים. מודל ערבוב של גוף ארצי חוזר עם מטרה ארצית נותן דפוס אחד; גופים אסטרואידיים, כולל ממוינים, נותנים דפוס שני, זר. מצב המקור נקבע לפני שמשווים את המדידות.

היכן בסדרה. מאמר 8 E.1–E.2, B14, חלק F שורה 1, G.2§ פריט 8; מאמר J.7§ פריט עבודה עתידית 4, M.3§; מאמר 6 L.5§, פריט עבודה עתידית 6, O.1§; מאמר D.3§ 11 (R14), C.6; מאמר E.2, §F.3§ 1, פריט D.1§ 4.

110 מאזן איזוטופים רב-מערכתי (R1)

כדור הארץ והירח כמעט זהים באיזוטופי החמצן שלהם: $\Delta^{17}\text{O}$, המדד לטביעת האצבע של החמצן, נבדל ב- 5 ± 1 ppm. מבחינת המודל זה צפוי, שכן הירח עשוי מחומר ארצי. אבל החמצן הוא מערכת אחת מתוך כמה. אותו הרכב התחלתי — הקליפה של כדור הארץ הקדום ועוד הזרם העולה העמוק שהזין את האגס — צריך לתת גם את הערכים הירחיים של טיטניום, כרום, טונגסטן והיסודות הנדיפים, אחרי שעבר ניתוק ואידוי. מאזן שנסגר במערכת אחת ונכשל באחרת לא היה תומך במודל.

השאלה. האם הרכב אחד — הקליפה של כדור הארץ הקדום ועוד הזרם העולה העמוק, אחרי ניתוק ואידוי — מתאים לנתונים הירחיים ב-O, Ti, Cr, W וביסודות הנדיפים יחד?

מה המודל צופה. חומר ארצי לכל אורך הדרך. חמצן: $\Delta^{17}\text{O} = -5 \pm 1$ ppm (מאמר 11).

נתונים. נתוני איזוטופים ירחיים וארציים שפורסמו.

שיטה. מודל ערבוב והפרדה (פרקציונציה) רב-מערכתי, שמורץ עם סט קלטים אחד לכל המערכות.

היכן בסדרה. מאמר 11, פריט עבודה עתידית 2; §D.3, §B.1, A.1; מאמר §1 (R1) E.1.

111 תקציב המתכת: הגלעין כמד (R2, R13)

הגלעין של הירח קטן: כ-1.4% ממסתו (בטווח 1%–2%), ברדיוס של כ-330 ק"מ. במודל, החומר של הירח עלה ממקור הסמוך לברזל ששקע אל גלעין כדור הארץ, אך לא ממנו עצמו. התך מוקצף עולה גורף איתו טיפות מן הברזל הזה; חלקן שוקעות בדרך, חלקן נישאות למעלה. לכן גודל הגלעין הירחי מודד עד כמה עמוק הגיעה ההזנה. הנושא הוא לחשב את החלק הנגרף ולבדוק אם הוא נותן 1.4%.

השאלה. איזה חלק מן הברזל השוקע גורף איתו התך מוקצף עולה, והאם הוא נותן גלעין ירחי של כ-1.4% (1–2%) ממקור הסמוך לברזל השוקע, אך לא בו?

מה המודל צופה. הגלעין הקטן מודד עד כמה עמוק הגיעה ההזנה (מאמרים 3 ו-11).

נתונים. הגודל הסיסימי של הגלעין (כ-1.4%); קצב ההזנה של מאמר 3.

שיטה. דינמיקת זורמים של גריפת טיפות ושקיעתן בהתך עולה.

היכן בסדרה. מאמר 11, פריט עבודה עתידית 3; §D.3, §C.6, §B.2, A.2; מאמר §3 (R13) C.10; מאמר 1 F.2§.

112 הפתרון המשותף של הקרום ומרכז המסה (R3, R7)

מרכז המסה של הירח נמצא כ-2 ק"מ ממרכז הצורה שלו, לעבר כדור הארץ. במודל, ההיסט הזה, הקרום העבה בצד הרחוק והימות בצד הקרוב הדק הם התפלגות אחת של חומר, הנראית בכמה דרכים. מאמר 11 מראה שקרום בצורה הממודלת מסיט את מרכז המסה ב-1.24–3.11 ק"מ עבור ניגודי צפיפות של 300–750 ק"ג/מ"ק — טווח רגישות, לא עדיין תחזית — ושהקליפה שנבנתה על הכיפה של מאמר 3, $10^{21} \times 2.85$ ק"ג, מתאימה לקרום של הצד הרחוק, $10^{21} \times 2.6$ ק"ג, בדיוק של כ-10%, בלי שום פרמטר שכוון ביניהם. הנושא הוא להחליף את הטווח במודל צפיפות אחד שנותן את הגודל ואת הכיוון של ההיסט יחד עם העובי הנמדד. משום ש-R3 ו-R7 מתארות התפלגות אחת, הן נבדקות פעם אחת ואין נספרות פעמיים.

השאלה. האם מודל צפיפות אחד, הנתמך בנתונים, נותן את הגודל ואת הכיוון של ההיסט של 2 ק"מ במרכז המסה, יחד עם עובי הקרום הנמדד, על הגאומטריה של אזורי החשיפה?

מה המודל צופה. 1.24–3.11 ק"מ עבור ניגודים של 300–750 ק"ג/מ"ק, מול כ-2 ק"מ שנצפו. הקליפה, $10^{21} \times 2.85$ ק"ג, מול הקרום של הצד הרחוק, $10^{21} \times 2.6$ ק"ג (מאמר 11).

נתונים. הכבידה של GRAIL; הטופוגרפיה של LOLA; מודלי הקרום של GRAIL.

שיטה. היפוך משותף של הקרום ומרכז המסה.

היכן בסדרה. מאמר 11, פריט עבודה עתידית 4; §B.3, §B.7, A, §D.3; נספח §D.3; מאמר §3 D.2; מאמר §1 F.2.

113 שני קרומים, שני גילים (R5)

במודל הצד הרחוק נסגר ראשון: פני השטח שלו היו הצד החיצוני של הכיפה מן ההתחלה, והוא נשמר בזמן שהצד הקרוב עוד היה מחובר לכדור הארץ. לכן קרום הרמות של הצד הרחוק צריך להיות עתיק מקרום רמות

בר-השוואה בצד הקרוב. את ההשוואה יש לערוך בין יחידות דומות, מחוץ לאגנים, ועם אותו סוג שעון: גיל התגבשות מושווה לגיל התגבשות, ולא לגילו של התך מאוחר יותר.

השאלה. האם קרום הרמות של הצד הרחוק עתיק מקרום רמות בר-השוואה בצד הקרוב, כשהדימות נלקחות מחוץ לאגנים?

מה המודל צופה. הצד הרחוק נסגר ונשמר ראשון (מאמר 11).

נתונים. חומר של Chang'e-6; דימויות עתידיות מן הצד הרחוק.

שיטה. גילי התגבשות של יחידות ברות-השוואה בשני הצדדים.

היכן בסדרה. מאמר 11, פריט עבודה עתידית 5; §D.3, §B.5, §A.5.

114 חומרים נדיפים בכמות ובפאזה שההזנה צריכה (R6)

לחומרים הנדיפים — מים וחומרים אחרים שהופכים לגז בלחץ נמוך — יש במודל שני תפקידים. כשהם מומסים או כבועות, הם מורידים את צפיפות ההזנה כך שהעמוד יכול לעמוד עד רדיוס הקורוטציה; ובהתפשטותם הם מספקים את הלחץ שלו. תכלילי התך ירחיים, טיפות קטנות של התך שנכלאו בגבישים, מכילים 1,410–615 ppm מים, ולכן הפנים אינו יבש. מה שעוד צריך לגזור הוא הכמות והפאזה (מומס או כגז) שההזנה הייתה צריכה, בעת ובעונה אחת, לצפיפות, לזרימה וללחץ.

השאלה. האם המים הנמדדים בתכלילי ההתך הירחיים (1,410–615 ppm) מתאימים לכמות ולפאזה שהצפיפות, הראולוגיה והלחץ של ההזנה דורשים בעת ובעונה אחת?

מה המודל צופה. החומרים הנדיפים מורידים את צפיפות ההזנה ומספקים את הלחץ שלה (מאמרים 3 ו-11).

נתונים. מים בתכלילי התך ובאפטיט.

שיטה. דרישת ההובלה של נושא 4, מוצבת מול המלאי הנמדד.

היכן בסדרה. מאמר 11 §D.3, §B.6, §A.6; מאמר 3 §A.6.

115 אסימטריה צפון-דרום כש-South Pole-Aitken מוסר

הירח אסימטרי בבירור בין הצד הקרוב לצד הרחוק. האם הוא אסימטרי גם בין צפון לדרום — זה אינו מוכרע, והתשובה נשלטת בקלות על ידי תופעה אחת: South Pole-Aitken, האגן הגדול ביותר על הירח, נמצא כולו בדרום. כל הבדל צפון-דרום ש-SPA לבדו יוצר אינו אומר דבר על שאר הגוף. הנושא הוא להסיר את האסימטריה קרוב-רחוק ואת האגנים הגדולים, ובראשם SPA, ולראות אם נשאר משהו.

השאלה. האם נשאר אסימטריה צפון-דרום כלשהי של הירח לאחר שמוסרים את האסימטריה קרוב-רחוק ואת האגנים הגדולים, ומעל כולם SPA?

מה המודל צופה. יש לבחון ולא להניח; SPA לבדו אינו רשאי לאשש זאת (מאמר 11).

נתונים. מודלי הקרום של GRAIL; קטלוגי מכתשים.

שיטה. ניתוח אסימטריה שבו SPA והאגנים הגדולים ממוסכים בשני חצאי הכדור.

היכן בסדרה. מאמר 11 §C.5; מאמר 7 §D.4 (The Poles).

116 ההרכב של ליבת הירח: הברזל של כדור הארץ, שנתפס בדרכו מטה

נושא 111 שואל כמה גדולה צריכה להיות ליבת הירח; הנושא הזה שואל ממה היא עשויה. ליבות של כוכבי לכת אינן ברזל טהור: תמיד מומס במתכת יסוד קל כלשהו, וזהות היסוד רושמת איך הליבה נוצרה. צורן וחמצן נכנסים לברזל בעיקר כשמתכת וסיליקט נפגשים בלחצים ובטמפרטורות הגבוהים של ליבה עמוקה וגדולה; גופרית נכנסת בלחץ נמוך, כשטיפות מתכת שוקעות דרך מעטפת סיליקטית. במודל ליבת הירח היא הברזל של כדור הארץ. כשהאגס גדל, הברזל של כדור הארץ עדיין שקע לעבר הליבה שלו; כמות גדולה ממנו השתתפה באגס, רובה שקעה חזרה אל כדור הארץ עם החומר החוזר, והירח שמר את מה שהגיע לקצה (מאמר 3, C.10§). הברזל הזה התכנס אחר כך במרכז הירח. ליבת הירח היא אפוא מתכת ארצית, אבל מתכת שנתפסה בדרכה מטה: היא עוד לא הצטרפה לליבה העמוקה ולא הגיעה לשיווי משקל בלחצים שלה. היסוד הקל שלה צריך לרשום זאת: הגופרית של מתכת שהגיעה לשיווי משקל בלחצים הנמוכים יותר של השקיעה, ולא הצורן והחמצן של מתכת שהגיעה לשיווי משקל בבסיס של ליבה גדולה.

השאלה. האם היסוד הקל של ליבת הירח הוא גופרית, ולא צורן וחמצן?

מה המודל צופה. ליבת הירח היא ברזל ארצי, שעלה עם ההזנה בזמן שהברזל של כדור הארץ עדיין שקע (מאמר 3, C.10§); היסוד הקל שלה הוא בעיקר גופרית. ליבה שהיסודות הקלים שלה הם בעיקר צורן וחמצן, כמו במתכת שהגיעה לשיווי משקל בבסיס של ליבה גדולה, אינה תומכת בקריאה הזאת.

נתונים. הליבה הסייסמית של Weber et al (2011), ברדיוס של כ-330 ק"מ עם ליבה פנימית מוצקה של כ-240 ק"מ, והצפיפות ומהירויות הגלים שלה; נתונים סייסמיים חדשים מרשת גיאופיזיקלית ירחית עתידית; מדידות מעבדה של הצפיפות ומהירות הקול של נוזלי ברזל-גופרית וברזל-צורן-חמצן בלחצים של ליבת הירח.

שיטה. הצפיפות ומהירויות הגלים שנמדדו בליבה החיצונית מושוות לאלה של הסגסוגות המועמדות בתנאי הירח; מודל של תכולת היסוד הקל במתכת של כדור הארץ בזמן שקיעתה, שהובלה אל הקצה והתכנסה במרכז הירח.

היכן בסדרה. ההרכב של הליבה עדיין לא בסדרה; הוא עלה ברשימות העבודה של המחבר (האוסף של 16.10.2026). הליבה כמד של ההזנה: מאמר 3 C.10§; מאמר 11 A.2§, B.2§ ו-C.6§ (R2, R13); נושא 111.

117 היסט הליבה כשארית של היסט מרכז המסה

מרכז המסה של הירח נמצא כ-2 ק"מ ממרכז הצורה שלו, לכיוון כדור הארץ. מאמר 11 מסביר זאת בקרום: קרום קל שהתעבה בצד הרחוק מזיז את נקודת האיזון לכיוון הצד הקרוב, ב-1.24–3.11 ק"מ עבור הפרשי צפיפות של 300–750 ק"ג/מ"ק בדוגמה שלו, והוא מניח ליבה סימטרית שאינה מוסיפה דבר בכיוון הזה. נושא 112 מבקש מודל צפיפות אחד לקרום ולמרכז המסה יחד. הנושא הזה מוסיף רכיב נפרד. ההצעה של המחבר היא שהליבה עצמה אינה במרכז: הברנר דחף אותה אל מעבר למרכז הגאומטרי של הירח; לפני שהתקררה לגמרי היא חזרה לכיוון המרכז; ואחר כך כבידת כדור הארץ משכה אותה לכיוון כדור הארץ עד שקפאה במקומה של היום. סדר הגודל הוא חשבון פשוט: ליבה של 1–2% ממסת הירח שזזה מרחק d מזיזה את מרכז המסה בכ-1–2% מ- d , ולכן 2 ק"מ מתאימים ל- d של כ-100–200 ק"מ — ואף יותר, כי רק עודף המסה של הליבה על המעטפת שהיא דוחקת נחשב. יש עובדה אחת שצריך להתמודד איתה: כבידת כדור הארץ מושכת את הליבה ואת שאר הירח כמעט באותה מידה, ורק הגאות, שהיא חלשה, מפרידה ביניהן. בזמן החיבור ובזמן הדחיפה של הברנר ייתכן שהכוחות היו אחרים; זה צריך להיות מחושב.

השאלה. כמה מהיסט מרכז המסה, בגודל ובכיוון, נשאר אחרי שהקרום והטופוגרפיה נלקחים בחשבון, והאם השארית הזאת מתאימה לליבה שזזה לכיוון כדור הארץ?

מה המודל צופה. שארית לכיוון כדור הארץ, שמתאימה לליבה שזזה בסדר גודל של 100–200 ק"מ או יותר. שארית של אפס, או שארית שמצביעה הרחק מכדור הארץ, אינה משאירה מקום לליבה מוזת.

נתונים. הטופוגרפיה של LOLA (מרכז הצורה); הכבידה של GRAIL ומודלי עובי הקרום של GRAIL; הליבה הסייסמית של כ-330 ק"מ, כ-1.4% מהמסה (1–2%).

שיטה. וקטור ההיסט המלא מחושב מן הקרום והטופוגרפיה עם מודל צפיפות אחד (נושא 112); וקטור השארית מתורגם להזזה של ליבה בגודל הסייסמי, עם עודף הצפיפות שלה על המעטפת; וחישוב של הכוחות שיכלו להחזיק את הליבה מחוץ למרכז — הגאות, ותנאי החיבור והברנר — כדי לבדוק אם הזזה כזאת יכולה להיווצר ולקפוא במקומה.

היכן בסדרה. מאמר 11 A.7§ (מרכז המסה הכולל כולל את הליבה), B.7§ (דוגמת הקרום עם ליבה סימטרית); ציר המגע מול קו כדור הארץ הממוצע), פריט עבודה עתידית 4; מאמר 3 E.5§ עושה חישוב מאותו סוג עבור ליבת כדור הארץ תחת האגס. הליבה המוזת של הירח עלתה ברשימות העבודה של המחבר (האוסף של 16.10.2026).

118 מינימום יתום בעובי הקרום

במודל הקרום של הירח מודלל בכמה דרכים ידועות. בקנה מידה רחב, הוא הדק ביותר מעל המגע ומתעבה דרך החגורה אל הצד הרחוק (נושא 107). בקנה מידה מקומי, הוא מודלל מתחת לפתחים, במקום שבו כיפת הזנה עלתה מתחת לכל ים: מאמר 5 מצא קפיצה בעובי של 8 ק"מ או יותר מתחת ל-29 מתוך 36 הפתחים המסומנים, מול 4 מתוך 169 מכתשים רגילים. והוא מודלל מתחת לאגנים הגדולים. למינימום מקומי בעובי שאינו נמצא מתחת לאף אחד מאלה — מינימום יתום, לא מתחת לאגן ולא מתחת לפתח — אין מקום במודל. מינימום כזה היה מהווה קושי, ומפות הקרום עדיין לא נסרקו כדי לחפש אותו.

השאלה. האם במפת עובי הקרום יש מינימום מקומי שאינו נמצא מתחת לאגן ואינו נמצא מתחת לפתח?

מה המודל צופה. מינימום כזה אינו קיים. כל מינימום מקומי של הקרום נמצא מתחת לפתח או מתחת לאגן; ההידקקות הרחבה של אזור המגע היא הסדר של אזורי החשיפה, ולא מינימום מקומי. מינימום יתום היה מהווה קושי למודל.

נתונים. ארבעת מודלי עובי הקרום של GRAIL (Wieczorek et al. 2013); הפתחים של מאמר 5; קטלוג האגנים הירחיים שזוהו בכבידה של GRAIL (Neumann et al. 2015).

שיטה. חיפוש אוטומטי של מינימומים מקומיים בכל אחד מארבעת המודלים, כשהעומק והגודל של מינימום נקבעים לפני הסריקה — למשל הטבעות וסף 8 הק"מ של מאמר 5 D.2§ (מהמרכז עד 0.3 רדיוס, מול טבעת של 1.3–2.0 רדיוסים); כל מינימום שנמצא מותאם לפתחים ולאגנים, ואלה שלא הותאמו נרשמים בכל ארבעת המודלים.

היכן בסדרה. מאמר 5 D.2§ (הקרום מתחת לפתחים ולמכתשי הביקורת); מאמר 11 B.8§ (אזורי החשיפה); מאמר 3 B.7§ (הקרום הלא אחיד). הסריקה למינימום יתום עלתה ברשימות העבודה של המחבר (האוסף של 16.10.2026).

חלק K — איך לבחור

מאה ושמונה-עשר הנושאים של המאמר הזה אינם שווים. שניים מהם הם תצפיות המפתח של המודל; רבים יכולים להתבצע בידי חוקר אחד, על נתונים ציבוריים, בתוך חודשים; אחרים זקוקים לסימולציה גדולה, למעבדה או למשימת חלל. החלק הזה ממיינ אותם לשלוש רשימות, כדי שקורא שמחפש נושא יוכל למצוא נושא שמתאים לזמן, לכלים ולנתונים שעומדים לרשותו. המוכנות של כל נושא היא זו שניתנה בטבלה שבראש החלק שלו.

K.1 רשימה 1 — שתי תצפיות המפתח של המודל

שתי תצפיות נושאות את התחזיות העיקריות של המודל. שתיהן נמדדו בחלקן; את שתיהן אפשר להשלים. **הגאומטריה של החשיפה (נושאים 107 ו-108).** הירח צריך להיות מסודר בשלושה אזורים סביב מרכז אחד בצד הקרוב: אזור המגע, שנחשף אחרון, עם הקרום הדק ביותר והמכתשים המעטים ביותר; החגורה שסביבו; והחלק הרחוק, שהיה חשוף מן ההתחלה. הטבלה מציגה את שני הגדלים שנמדדו עד כה. יש לקרוא אותה מימין לשמאל: הצבע מעמיק ככל שהקרום מתעבה או שהמכתשים מתרבים, וזה הכיוון שהמודל דורש.

גודל	אזור המגע	חגורה	החלק הרחוק	מצב
מכתשים של 20 ק"מ ומעלה לכל 10 ⁶ קמ"ר, גאומטריה נוכחית, ימות ו-SPA מוסרים בכל אזור	53	187	220	הסידור מתקיים; רחוק/חגורה 1.17, רחוק/מגע 4.15, חגורה/מגע 3.55
קרום, מודל 1, גאומטריה נוכחית, הימות נשארים (ק"מ)	26.3	30.3	36.2	הסידור מתקיים; ניגוד של 9.9 ק"מ
קרום, מודל 1, גאומטריה נוכחית, ימות ו-SPA מוסרים (ק"מ)	31.3	33.0	38.9	הסידור מתקיים; ניגוד של 7.5 ק"מ

הסידור, שהוא החיזוי, מתקיים בכל ארבעת מודלי GRAIL. הניגוד על הגאומטריה של ספטמבר, כ-10 ק"מ (להלן), הוא מספר לכיוול.

T1: הרחוק פחות המגע (ק"מ)	מודל 1	מודל 2	מודל 3	מודל 4
ניגוד, גאומטריית ספטמבר	9.65	10.0	10.3	10.6
הסידור מגע > חגורה > רחוק	מתקיים	מתקיים	מתקיים	מתקיים

הסידור של הקרום ושל המכתשים סביב המרכז שבצד הקרוב מתקיים בכל מודל ובכל ספירה. ניגוד הקרום הוא 9.65 / 10.0 / 10.3 / 10.6 ק"מ במודלים 1-4. ההרצה החוזרת של כל ארבעת המודלים על הגאומטריה הנוכחית (נושא 107) והשלמת T2 לפי גיל, T3, T4 ורשתות הכבידה (נושא 108) מכריעות את התצפית הזאת.

מקור המכתשים (נושאים 49 ו-109). במודל המכתשים נוצרו על ידי חומר ארצי חוזר. נושא 49 קורא את הגוף החוזר בפנים המכתשים — התכים וזכוכיות, בהשוואה לים-המקור המועמד; נושא 109 מכריע באמצעות איזוטופים. טיעון המסה כבר עומד, והוא מוצג להלן: הצבע מעמיק ממה שהקרום מכיל אל מה שגופים מבחוץ היו דורשים.

חומר זר ב-5 הק"מ העליונים של הקרום	חלק
מה שהקרום מכיל (נמדד, לכל היותר)	0.9–2%
הנדרש אילו המכתשים הנראים נוצרו על ידי גופים מבחוץ ($10^{19} \times 5.0 - 4.4$ ק"ג)	2–6%

תוצאה

כ-99% מהמכתשים עשויים מחומר ארצי חוזר, והרתונים שנמדד עד כה הוא ארצי. האיזוטופים של המתכת בנוריטים של Chang'e-6 ובהתכים של אגני הימות מכריעים את התצפית הזאת (נושא 109).

K.2 רשימה 2 — נושאים שאפשר לבצע עכשיו על נתונים ציבוריים

הנושאים האלה אינם צריכים משימה חדשה ולא קוד גדול. הנתונים ציבוריים — הכבידה והקרום של GRAIL, הטופוגרפיה של LOLA, התמונות של LROC, קטלוג המכתשים של (Robbins 2019), מפות תוריום וברזל, רשתות בתימטריה וגיל של קרקעית הים, אנליזות דגימות שפורסמו — והשיטה היא ספירה, פרופיל, התאמה או היפוך. כל אחד מהם יכול להיות נושא למאמר אחד. הטבלה מקבצת אותם לפי חלק.

חלק	נושאים
B. הגוף על הקצה	19 הקרום המרובד של הצד הרחוק; 21 KREEP כשפה הקרועה של הסיאל; 23 הנקבוביות של הירח כולו לפי עומק
D. הימות והפתחים	31 סדר האיטום; 32 תוריום ברזולוציה גבוהה מעל כיפות ההזנה; 33 טבעת השפה של הימות העשירים בחומרים נדיפים; 34 חשיפה הדרגתית בתוך ים אחד; 35 פתחי פליטה ומעברים; 36 החלק של הטיטניום במחקר 13; 37 הצווארון של הימות הפתוחים בצד הרחוק; 38 הבורות והמערות של הירח כחללי אדים; 39 קפיצת הקרום לפי גיל האגן; 40 קוטר הפתח לפי משך ההזנה; 41 השפה של ים כרישום שכבות; 42 פסגות קהות או חדות בצד המישור; 43 סימני הכבידה של המכתשים שנעלמו בימות

E. המכתשים ומקורם	51 רישום קווי האורך; 53 כדור הארץ כמפזר האחרון; 54 חומר שאחרי השחרור עני יותר בברזל; 55 הברזל של הקרקעיות הגבוהות והנמוכות; 56 גילי ספירת מכתשים מול גילים ישירים; 57 הקרניים של המכתשים הצעירים: חומר בתוך פני השטח
F. הקטבים	58 המכתשים הצעירים של הקטבים; 61 המרווחים בין המכתשים הקוטביים; 62 הסימנים של הקליפה; 64 המכתשים הקוטביים הרדודים יותר; 65 הכיוון של מכתשים מוארכים; 66 קנה המידה הקוטבי; 67 האליפטיות של המכתשים, והקטבים מול חגורת השוליים
G. South Pole–Aitken	72 מכתשים רדודים ומינימום העומק; 73 מבחן האפס ל-Serenitatis; 75 הריסוס המאוחר של שברים קטנים; 76 שתי אוכלוסיות מכתשים; 77 היפוך ישיר של הנקבוביות; 78 הקרום החסר של SPA
H. הפסים והאוקיינוס השקט	88–80 מחקרי הפסים 9–1
I. מאדים וגופים אחרים	99 הגומות והחריצים של 100 Phobos; עומק השקעים; 102 ארבע הקלדרות וגירעון המסה מתחת ל-Pavonis
J. הדרישות ומבחני המפתח	107 הרצה חוזרת של T1 על הגאומטריה הנוכחית; 108 השלמת הסטטיסטיקה של החגורות; 115 אסימטריה צפון-דרום כש-SPA מוסר; 118 מינימום יתום בעובי הקרום

נושאים 107 ו-108 נמצאים ברשימה הזאת וגם ברשימה 1: העבודה החשובה ביותר במאמר היא גם מן הנגישות ביותר.

K.3 רשימה 3 — נושאים שדורשים סימולציה גדולה, משימה או דגימות

שאר הנושאים דורשים יותר מנתונים ציבוריים וניתוח קצר. חלקם דורשים פיזיקה חדשה שתיבנה במודל או בסימולציה גדולה (כתום); חלקם דורשים מעבדה, דגימה שהוחזרה או משימה (כחול). הטבלה מפרידה בין שני הסוגים. בשורות הכתומות הקלטים קבועים על ידי הסדרה, כך שקבוצת מידול יכולה להתחיל מיד; בשורות הכחולות התחזיות נכתבות כבר עכשיו, כך שהמדידה, כשתגיע, תהיה מבחן ולא התאמה.

חלק	נושאים
מידול חדש או סימולציה גדולה	
A. כדור הארץ לפני האגס ובזמנו	1 ההתפשטות התרמית של גוף האם החם; 2 בעיית Maclaurin המרובדת; 3 היווצרות הגלעין והיסטוריית Hf–W; 5 האנרגיה של ההרמה; 6 מבחן הלחץ עם מסת האגס; 7 קצב הבנייה; 8 צורת שיווי המשקל של האגס (R9); 9 ההטיה של האגס צפונה; 10 גלעין כדור הארץ בזמן האגס; 11 מסלול הביקוע הקלאסי, מחושב מחדש
B. הגוף על הקצה	12 סימולציה תלת-ממדית של הגוף המחובר; 13 קליפה קשיחה מעל בסיס נייד; 14 מ- $a/c \approx 1.20$ אל צורה עגולה; 15 ההיסחפות של קו הרוחב של השחרור; 17 הלחץ הכלוא בזמן הניתוק; 18 הישרדות בתוך גבול רוש הנוזלי; 20 הקרום של הצד הקרוב מעל המגע

C. המסלול	24 האינטגרציה המצומדת התרמית-מסלולית; 25 היסטוריית הפיזור של כדור הארץ; 26 תחילת ההתרחקות; 27 המתג של אוקיינוס המאגמה; 28 הצורה המאובנת; 29 קו הרוחב הקדום, משוחזר
D. הימות והפתחים	30 המנוע של הפתחים
E. המכתשים ומקורם	44 מהירות היציאה; 45 המעבר דרך אטמוספרת הקיטור; 46 הלם במטרה חמה ומרובדת; 48 התפלגות גודלי המכתשים, מופצת; 50 פליטה שנלכדה אחרי השחרור; 52 העודף בצד הנגרר
F. הקטבים	59 הצורה עם חוזק; 60 הגאות על גוף המוחזק בבסיסו
G. South Pole–Aitken	68 מודל פיזיקלי של ציר החום; 69 תקציב חמצון-חיזור למעטפת המחוזרת; 70 המבחנים הדינמיים, מחושבים מחדש; 74 ים מוקדם גדול ב-SPA, שנקבר מאוחר יותר
H. הפסים והאוקיינוס השקט	90 שחזור בלתי תלוי של הליתוספרה של האוקיינוס השקט
I. מאדים וגופים אחרים	91 מאדים הצעיר והסיבוב שלו; 92 דחיפת הגז; 93 הפקק הרך; 94 הגרר בצינור; 95 הטבעת; 96 הטיפוס של Deimos; 97 המרוץ של Phobos; 105 הגופים האחרים; 106 הקטבים והסיבוב
J. הדרישות ומבחני המפתח	110 מאזן איזוטופים רב-מערכתי (R1); 111 תקציב המתכת (R2, R13); 112 הפתרון המשותף של הקרום ומרכז המסה (R3, R7); 114 החומרים הנדיפים שההזנה צריכה (R6); 117 היסט הליבה כשארית של היסט מרכז המסה
משימה, דגימות או נתוני מעבדה חדשים	
A. כדור הארץ לפני האגס ובזמנו	4 משוואת המצב של ההתך העמוק ב-50–150 ג'יגה-פסקל
B. הגוף על הקצה	16 הידבקות Stefan והכשל של המגע; 22 פאזות של לחץ גבוה בדגימות מאזור המגע
E. המכתשים ומקורם	47 המגמה בסדרת אירועים; 49 לראות את הגוף החוזר, לא את הקרקע
F. הקטבים	63 הכיפות הפנימיות ביותר
G. South Pole–Aitken	71 מפל החומרים הנדיפים והחמצון-חיזור לרוחב האגן; 79 אדים שאידו מתכות ב-SPA, ולאן הלכו
H. הפסים והאוקיינוס השקט	89 המחוז הפסיפי כאגס שחזר (איזוטופי הפלומות)
I. מאדים וגופים אחרים	98 הדגימות של MMX; 101 מרכז המסה של Phobos; 103 האבק של מאדים; 104 צינור אחד על קו המשווה (R18)
J. הדרישות ומבחני המפתח	109 ההכרעה האיזוטופית (R14); 113 שני קרומים, שני גילים (R5); 116 ההרכב של ליבת הירח

מבין הסימולציות הגדולות, נושא 12 (הגוף המחובר בתלת-ממד) ונושא 24 (האינטגרציה המצומדת התרמית-מסלולית) נושאים את המשקל הרב ביותר: הראשון עוקב אחר הגוף מן הבנייה ועד השחרור, השני

מוביל אותו מן השחרור אל המסלול של היום. מבין המשימות, MMX מכריעה ארבעה נושאים בבת אחת (97, 98, 100, ובאמצעות הגיל של Deimos — גם 104).

עבודה עתידית מחוץ למאמר הזה

שני נושאים מזכרים בסדרה כעבודה עתידית ואינם ממוספרים כאן. הראשון הוא מערכת הצירים של כדור הארץ והירח מן השחרור ועד היום: ארבעה מישורים — קו המשווה של כדור הארץ, מסלול הירח, קו המשווה של הירח והמילקה — הנעים בשני סוגי תנועה בקצבים שונים, עם זיכרון לא ידוע שנשמר בבליטה קפואה. הצעד הראשון שלו הוא ערוץ נטיית הציר: הנטייה של 3.8° שניתנה לציר הסיבוב של כדור הארץ בשחרור, והאם הצימוד בין השמש, כדור הארץ והירח הגדיל אותה או ריסן אותה בדרך אל 23.44° של היום; שינוי בציר של כדור הארץ אחרי הניתוק עשוי גם לגרום ל-South Pole–Aitken להיראות שלא בקו אחד עם הברנר. השני הוא המגנטיות של הירח: מקור השדה הקדום שלו, והדפוס שלו מעל South Pole–Aitken — מחוק במרכז, חזק בצד הנגרר, עם המערבולות (swirls) של Ingenii — שבסדרה נקרא כרישום של חום ושל ברזל מכדור הארץ. הוא כולל את המבחן של העומק והכיוון של המגנט, שצריך להיות החזק ביותר בשולי הליבה המחוממת ומקורו בעומק.

מקורות

- .Duran, Z. Papers 1–11 of the LEF series (2026)
- GRAIL crustal-thickness models: Wieczorek, M. A., et al. (2013). The crust of the Moon as seen by GRAIL. *Science* 339, 671–675
- .GRAIL gravity field GRGM1200B: NASA Planetary Data System, GRAIL Radio Science archive
- Robbins, S. J. (2019). A new global database of lunar impact craters >1–2 km: 1. Crater locations and sizes, comparisons with published databases, and global analysis. *Journal of Geophysical Research: Planets* 124, 871–892
- .LROC: Lunar Reconnaissance Orbiter Camera (WAC and NAC), NASA Planetary Data System
- .MMX: Martian Moons eXploration, Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA)