

THE LEF MODEL · A SERIES OF TWELVE PAPERS

Lunar Elevation & Fission

3. מנגנון LEF בפועל

לחץ והאגס: בניית הירח מבפנים ומבחוץ

חלקים A-E · נספחים A-B

זהר דוראן

חוקר עצמאי, רמלה, ישראל

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

תרגום מלא לעברית של המאמר האנגלי · 15 באוקטובר 2026

הסביבה הפיזיקלית של המאמר

החישובים מתארים תרחיש על כדור הארץ המוקדם, בתקופת היווצרות הירח לפני כ-4.5 מיליארד שנה. במצב ההתחלתי מסת החומר שממנו ייבנה הירח כלולה בגוף-האם — כדור הארץ הצעיר לפני שהירח עזב אותו. במהלך הבנייה המסה הזו עוברת אל גוף מתפתח, ובמקביל משתנים פיזור הצפיפות, הסיבוב, שדה הכבידה והמצב התרמי. המאמר הזה מתייחס לבנייה כולה — ההזנה מבפנים והתרוממות הקליפה החיצונית — כתהליך אחד על גוף אחד.

מכיוון שכל כך הרבה משתנה במהלך התהליך, אי אפשר להשתמש במספר שנלקח מרגע אחד ברגע אחר. לכן הטבלה מגדירה את הסביבה: לכל תחום היא מציינת אילו ערכים הם קלט, אילו משתנים עם הזמן, ואילו שייכים למצב בדיקה מוגדר. ערך מספרי בודד אינו יכול להחליף את הפרופיל הפיזיקלי שהחישוב דורש. העמודה הימנית מציינת את התחום; העמודה השמאלית נותנת את ערכי העבודה ואת הכללים לשימוש בהם.

תחום	סביבת העבודה והקלטים של מאמר 3
תקופה ומשך	התרחיש מתחיל לפני כ-4.5 מיליארד שנה. 600 מיליון שנה הם חלון התרחיש, מתחילת הבליטה ועד השחרור: כ-400 מיליון שנה לבליטה ולאגס, כ-100 מיליון שנה של פחיסות וכ-100 מיליון שנה עד השחרור לפני 3.873 מיליארד שנה. זה אינו משך בנייה שנמדד; 100 מיליון שנה משמשים לבדיקת רגישות.
המסה ההתחלתית	$M_0 = 6.0455 \times 10^{24} \text{ kg}$, ללא איבוד: סכום המסות המאומצות של כדור הארץ ושל הירח.
המסות בסוף חשבון הייחוס	$M_E = 5.972 \times 10^{24} \text{ kg}$, $m = 7.35 \times 10^{22} \text{ kg}$. במהלך הבנייה משתמשים ב- $M_E(t)$ וב- $m(t)$.
חומר בדרך ובהשלכה	חומר בחיבור, חומר חוזר וחומר שאבד משויכים למאגרים מפורשים. אותה מסה נספרת פעם אחת.
הרדיוס והצורה של גוף-האם	רדיוס נפחי התחלתי מאומץ $R_V = 6\,517 \text{ km}$; משווי כ-6,721 ק"מ וקוטבי כ-6,128 ק"מ במצב Maclaurin ההומוגני. הצורה משתנה עם הסיבוב ועם המבנה.
סיבוב ותנע זוויתי	$T_0 = 5.5 \text{ h}$; $L_0 \simeq 3.466 \times 10^{34} \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-1}$, נשמר כווקטור במערכת הסגורה. $I(t)$ משתנה עם המסה, הרדיוס והפיזור; אין להציב 5.5 שעות בכל שלב. בשחרור יום כדור הארץ הוא 5.77 שעות: האגס המתארך מאט את הסיבוב והליבה המתמרכזת מאיצה אותו (מאמר 2, §A.4).
קורוטציה	15,818 ק"מ ביום ההתחלתי של 5.5 שעות (מאמר 2); בשחרור, ביום של 5.77 שעות, 16,331 ק"מ (חלקיק-מבחן) ו-16,399 ק"מ (שני גופים) על המשווה, ו-17,287 ק"מ בקו רוחב 22.5° (מאמר 4). הירח מתחיל להיפרד כאשר מרכז המסה שלו מגיע לקו, ומשתחרר כ-210 ק"מ מעבר לו.

הגוף במצבי הייחוס	מסת היעד המלאה לאורך כל חלק B. ככדור: כ-2,270 ק"מ ב-1,500 ק"ג/מ"ק, 1,890 ק"מ ב-2,600, 1,738 ב-3,340 (≈3,344, הירח היום). יושב על קצה האגס ברוחב 6,000 ק"מ (שלב 2): 1,300 ק"ג/מ"ק, הכיפה העליונה שלו כ-3,650 ק"מ מעל שפת המגע (חלק B.2). אלה מצבי בדיקה, לא היסטוריית התכווצות שנפתרה.
הקליפה	השכבה הסיאלית החיצונית של גוף-האם מעל אזור הבנייה, שמתרוממת עם האגס וגולשת לאט כלפי מעלה אל קצהו, שם היא יוצרת את פני השטח של הכיפה העליונה; יחד עם החומר החוזר היא בונה את קרום הצד הרחוק, שכבות רבות של סיאל דחוס זו על זו (חלק B.7); צפיפות 2,800 ק"ג/מ"ק; שטח המקור הנאסף נקבע על ידי הכיפה העליונה (חלק B.1).
הפתחים	פתחי הזנה דרך הקליפה, שדרכם עולה חומר עמוק ומושלך; הם מזוהים עם אגנים שסיווגם נבחן במאמר 11.
חום ולחץ	נדרשים השדות $T(x, t)$, $p(x, t)$, שבר ההתכה וההרכב. לחץ המקור מחושב מאותו שדה שממנו מחושב עמוד הלחץ הנדרש.
חומרים נדיפים	מלאי קדום גדול מזה שנשאר היום הוא הנחת התרחיש. חומרים נדיפים יכולים להיות מומסים, בפאזה נפרדת או באדים, לפי הלחץ והטמפרטורה; אין להניח בועות בכל העומקים. תפקידם הוא להוריד את צפיפות החומר העולה, לא להעלות את לחץ המקור מעל הערך הליתוסטטי.
צפיפות וצמיגות	ρ ו- η הם גדלים שונים. הקליפה קשיחה וקרה ($10^{23} \gtrsim$ פסקל-שנייה אם היא אמורה לשמור על המכתשים שלה); הפנים חם ונייד; הממשק ביניהם הוא השכבה החלשה ביותר.
חיבור ושחרור	מאזני לחץ, כוח, מסה ואנרגיה בחלקים A ו-C. הקורוטציה אינה מרימה חומר — האגס מרים — אבל היא זו שמנתקת את הירח: הירח מתחיל להיפרד כאשר מרכז המסה שלו מגיע לקו, ומשתחרר כ-210 ק"מ מעבר לו, כשהמגע מתנגד רק מעט (C.5§).
המקור הגאוגרפי	בסיס האגס, עם הפתחים שלו, ליד Kiritimati, Kiribati (בערך $1.9^\circ N, 157.5^\circ W$), מעל ה-LLVP של האוקיינוס השקט (אזור איטי גדול במעטפת התחתונה); האגס נטה לאחור, מערבה וצפונה, מעל צפון-מרכז האוקיינוס השקט (הקריאה המוקדמת, בערך $25^\circ N, 165^\circ E$), וקצהו היה בכ- 22.5° צפון בשחרור (מאמר 4). קואורדינטות של ימינו, לפי השחזור של המחבר (B.1§).
לאחר השחרור	חיבור ההזנה מכדור הארץ פוסק. המסלול ותנאי ההישרדות הם אלה של מאמר 2; האבולוציה המסלולית שייכת למאמר 4.

כמה שורות דורשות מילת הסבר. **מסה**. המסה ההתחלתית M_0 היא כדור הארץ והירח של היום יחד; לא מניחים שדבר נמלט, ולכן הירח כולו היה פעם חלק מכדור הארץ, וה- 7.35×10^{22} ק"ג שלו נספרים פעם אחת — בתוך גוף-האם לפני ההעברה, בירח לאחריה, ובדרך (בחיבור, בחומר שהושלך ונפל חזרה) רק בזמן שהם בדרכם. **גודל וצורה**. הרדיוס של 6,517 ק"מ גדול מרדיוס כדור הארץ היום, משום שכדור ארץ צעיר וחם מורחב (מאמר 2). גוף נוזלי מסתובב בולט במשוואה שלו; מצב *Maclaurin* הוא צורת שיווי המשקל הקלאסית של גוף נוזלי מסתובב בעל צפיפות אחידה, כדור פחוס, והוא הופך את הנפח הזה לרדיוס משווני של כ-6,721 ק"מ ולרדיוס קוטבי של כ-6,128 ק"מ. **סיבוב**. *תנע זוויתי*, L_0 , הוא כמות הסיבוב שהמערכת מחזיקה; תהליכים פנימיים יכולים רק להעביר אותו מחלק אחד לאחר. *מומנט ההתמד*, $I(t)$, מודד כיצד המסה מפוזרת סביב ציר הסיבוב: מסה שזזה החוצה מגדילה אותו ומאטה את הסיבוב, מסה שזזה פנימה מקטינה אותו ומאיצה את הסיבוב, כמו מחליקה על הקרח שמסתובבת לאט יותר כשזרועותיה פרושות ומהר יותר כשהיא מקרבת אותן. זו הסיבה שהיום אינו קבוע על 5.5 שעות: האגס נושא מסה החוצה, הברזל שמתכנס אל הליבה נושא מסה פנימה, ובשחרור השניים יחד משאירים יום של 5.77 שעות.

קורוטציה. כל מה שמסתובב עם כדור הארץ משלים סיבוב אחד בכל יום של כדור הארץ, וככל שהוא רחוק יותר הוא נע מהר יותר; המהירות הדרושה למסלול מעגלי חופשי יורדת עם המרחק. *רדיוס הקורוטציה* הוא המרחק שבו שתי המהירויות שוות — המרחק שבו גוף שמסתובב עם כדור הארץ כבר נע במהירות של מסלול חופשי: כ-16,400 ק"מ בשחרור, בערך שניים וחצי רדיוסי כדור הארץ. גוף שנישא אליו בעודו מסתובב עם כדור הארץ כבר נע במהירות של מסלול. ערך חלקיק-המבחן (16,331 ק"מ) מתייחס לירח כאל חלקיק קטן; ערך שני הגופים (16,399 ק"מ) כולל את המסה שלו עצמו, וההפרש הקטן מראה עד כמה הפישוט הזה זניח. בקו רוחב 22.5° הקו רחוק יותר, ב-17,287 ק"מ, משום ששם גוף באותו מרחק מהמרכז קרוב יותר לציר הסיבוב ונע לאט יותר. **הגוף**. אותה מסה ירחית תופסת נפח גדול יותר כשהיא פחות צפופה, ולכן הטבלה מציגה את גודלו בכמה צפיפויות. ב-1,300 ק"ג/מ"ק הגוף מוקצף — מלא בגז מהחומרים הנדיפים שלו, בפחות ממחצית הצפיפות של הירח היום — ובמצב הקל הזה הלחץ של חלק A מסוגל להזין אותו ולהרים חומר בתוך האגס, בעוד שהאגס מרים את הגוף. אלה מצבי בדיקה לחישובים, לא היסטוריה פתורה של התכווצות הגוף.

הקליפה היא ס"אל: השכבה החיצונית הקלה של גוף-האם, עשירה בצורן ובאלומיניום, שמונחת על הסימה הצפופה והעשירה במגנזיום שמתחתיה (C.10§). **הפתחים** הם חורים דרך הקליפה הזו, שדרכם עלה חומר עמוק והושלך החוצה. **לחץ וחומרים נדיפים**. הלחץ שמניע את ההזנה והלחץ שההזנה צריכה להתגבר עליו מחושבים באותו שדה, כך שהמבחן אינו יכול לשאול ערך נוח מתמונה אחת וערך לא נוח מתמונה אחרת. החומרים הנדיפים אינם מוסיפים לחץ; לחץ המקור נשאר בערך הליטוסטטי, משקל החומר שמעליו. מה שהם עושים הוא להקל את ההתך העולה, כך שאותו לחץ מרים אותו גבוה יותר. **צפיפות וצמיגות**. צפיפות היא כמה כבד חומר ביחס לנפחו; צמיגות היא כמה חזק הוא מתנגד לזרימה. קליפה של 10^{23} פסקל-שנייה או יותר זורמת לאט כל כך שהמכתשים שלה שומרים על צורתם (B.3§), בעוד שהפנים החם שמתחתיה זורם בקלות; המקום שבו השניים נפגשים הוא השכבה שנכנעת ראשונה. **מקום**. בסיס האגס עמד ליד Kiritimati, במרכז האוקיינוס השקט. מתחתיו, בתחתית המעטפת, נמצא האזור האיטי הגדול של האוקיינוס השקט (LLVP): אזור בגודל של יבשת שבו גלים סייסמיים נעים לאט; טבעו נשאר פתוח (חלק E). האזור שב- 25° צפון, 165° מזרח, שפורש קודם כמקור, הוא גב האגס, שנטה מערבה וצפונה.

תקציר

גוף אחד, שנבנה בשתי דרכים בוזמנית. במודל LEF הירח נבנה מחומר של כדור הארץ בעודו מחובר אליו. המאמר מציג את המנגנון כתהליך אחד על גוף אחד. מבפנים, עלייה מגמטית — חומר עמוק וחם שנדחף כלפי מעלה על ידי לחץ פנימי — מזינה גוף מתרומם שנמצא תחת לחץ. מבחוץ, הקליפה הסיאלית החיצונית של גוף-האם (השכבה העליונה הקלה שלו), מתרוממת עם האגס מעל אזור הבנייה וגולשת לאט

כלפי מעלה אל קצהו, ושם היא העור של הגוף, פני השטח של הכיפה העליונה שלו; היא הופכת לקרום הצד הרחוק של הירח כשהגוף מתעגל.

מבפנים: הדחיפה מתומחרת. מבחן לחץ חד-ממדי על גוף-האם ההתחלתי נותן לחץ מקור משווני של 150.26 ג'יגה-פסקל — הלחץ במרכז גוף-האם, שנוצר ממשקל החומר שמעליו. הרמת התך עמוק אל רדיוס הקורוטציה, שם הסיבוב עם כדור הארץ כבר נותן מהירות מסלולית, עולה 139.78 ג'יגה-פסקל בצפיפות עמוקה של 3,500 ק"ג/מ"ק ומשאירה 10.49 ג'יגה-פסקל, כך שההזנה עוברת עבור התך קל מכ-3,864 ק"ג/מ"ק ונכשלת מעל ערך זה. מבחן משולב של עמוד לחץ, התנגדות לזרימה ועומס רדיאלי במצב אחד שאינו משווני מראה שמעבר צר וחסר מסה אינו יכול לבנות את הירח: המאזן הרדיאלי עובר רק מעל רדיוס מעבר של כ-1,000 ק"מ, ובו המעבר כבר מכיל 0.46 מסות ירח וצריך לשאת עומס צדי בסדר גודל של 10^{22} ניוטון. לכן החיבור רחב, חם ומסיבי.

מבחוץ: הגוף על הקצה. החלק החיצוני מספק את החיבור הזה ואת הגאומטריה שלו. בשלב הביניים הגוף יושב על הקצה הרחב של האגס, גוף פחוס מעל מגע של 6,000 ק"מ: הכיפה התחתונה שלו צמודה לקצה המעוקל, והכיפה העליונה שלו מתרוממת כ-3,650 ק"מ מעל השפה — הגובה שבו למסת הירח המלאה יש הצפיפות של מצב השיגור המוקצף, 1,300 ק"ג/מ"ק. לאחר מכן הגוף מתעגל החוצה, וכל חלק שומר על חלקו בפני השטח: המגע מצטמצם ל-3,000 ק"מ ונשאר מחובר, שאר הכיפה התחתונה מתקלף לאט יחד עם הסיאל שעליו ישב, ושלושת החלקים — המגע, הטבעת המתקלפת והכיפה העליונה — הופכים לכיפה בצד הקרוב של כ-31°, לחגורה עד 70° ולצד הרחוק. אחר כך הגוף נפחוס עם הסיבוב, ואז נוצרים רוב המכתשים הגדולים, ומתעגל פנימה כשהפחיסות נרגעת והגוף מתהדק: המכתשים שומרים על גודלם ומתקבצים בקטבים (מאמר 7); בשחרור הוא עגול. קרום הצד הרחוק הוא שכבות רבות של סיאל דחוס, שנבנו מסיאל שנדד אל הקצה ומחומר שחזר שוב ושוב, והוא אמור להיעשות צפוף יותר ועשיר יותר בברזל עם העומק.

האגס והשחרור. יש בליטה אחת: הלחץ מושך אותה החוצה, והיא הופכת לאגס מחומרו של כדור הארץ עצמו — ברוחב 9,000–11,000 ק"מ על פני השטח, שקצהו ברוחב 6,000 ק"מ בהתחלה ו-3,000 ק"מ בשחרור, בקשת אחת ללא מותניים — חלק מכדור הארץ, שמוחזק בכבידה של כדור הארץ כמו כל חלק אחר שלו; קצהו נושא את הגוף, שהופך לירח. כאשר מרכז המסה של הירח מגיע לקו הקורוטציה — כ-16,400 ק"מ ממרכז כדור הארץ על המשווה, 17,287 ק"מ בקו רוחב 22.5° — הוא מתחיל להיפרד; כוחות הקורוטציה מושכים אותו החוצה בכוח, והלחץ הפנימי מסייע, והוא משתחרר כ-210 ק"מ מעבר לקו, למסלול כמעט מעגלי (מאמר 4; C.5a§). האגס, שנמצא כולו בתוך הקו, אינו משאיר שארית במסלול; לאחר השחרור ההתמיינות אוספת אותו בחזרה אל כדור הארץ לאורך עשרות עד מאות מיליוני שנים.

מה המאמר מספק. המאמר מגדיר אילוצים כמותיים על הגאומטריה, על הראולוגיה ועל חלוקת המסה, ומנסח את הדרישות שהוא מציב למשוואת המצב העמוקה, לשחרור האנרגיה ולמבנה התלת-ממדי. חלק A מתמחר את ההזנה; B עוקב אחר הקליפה; C — החיבור, האגס והשחרור; D — תחזיות, מבחנים ומסקנות; E — מה שהאגס השאיר בכדור הארץ.

מה פירוש התקציר, במילים פשוטות. הזון מבפנים והתרומם מבחוץ מתאר שתי אספקות לגוף אחד. דמיינו בלון שממלאים אותו מצינור שמתחתיו, בעוד שהעור שלו הוא פני השטח המתוחים של הקרקע שעליה שכב. המילוי הוא ההזנה: חומר עמוק וחם שעולה בלחץ וזורם אל תוך הגוף. העור הוא הקליפה: השכבה החיצונית של כדור הארץ מעל אזור הבנייה, שהתרוממה עם האגס וגלשה לאט כלפי מעלה אל קצהו, אל תוך הגוף, ושם הפכה לפני השטח שלו. אף אחת מהאספקות לבדה אינה יוצרת את הירח. ההזנה נותנת לגוף את הפנים שלו —

המעטפת של כדור הארץ עצמו, ולכן לשניים יש אותו הרכב (C.10§) — והקליפה החיצונית נותנת לו קרום שכבר נשא מכתשים מתקופתו על כדור הארץ.

מה פירוש 150 ג'יגה-פסקל. עמוק בתוך כל גוף גדול החומר נלחץ על ידי משקל כל מה שמעליו. במרכז גוף-האם המשקל הזה, שהסיבוב מקל עליו מעט, מגיע ל-150.26 ג'יגה-פסקל. הלחץ הזה הוא המנוע של ההזנה: פתחו דרך מהפנים העמוק אל פני השטח, והחומר הלחץ יעלה לאורכה, כמו משחת שיניים שעולה כשלוחצים על השפופרת. השאלה היא אם הדחיפה חזקה מספיק. כדי לשאת התך מעומק המקור עד רדיוס הקורוציה, הלחץ צריך להחזיק את משקל כל עמוד ההתך לאורך הדרך; עבור התך של 3,500 ק"ג/מ"ק בעומק, שמוקצף ל-1,500 ק"ג/מ"ק מעל פני השטח, המשקל הזה הוא 139.78 ג'יגה-פסקל. הדחיפה עולה עליו ב-10.49 ג'יגה-פסקל, והייתה עולה עליו עבור כל התך קל מכ-3,864 ק"ג/מ"ק. זו משמעות המילים "הדחיפה מתומחרת": המאמר אינו מניח שהלחץ מספיק, הוא מחשב אותו.

מדוע החיבור צריך להיות רחב. אילו ההזנה הייתה עולה דרך צינור דק, הצינור היה צריך להחזיק את הגוף נגד המשיכה של כדור הארץ לאורך הקו שבניהם (העומס הרדיאלי) ונגד המשיכה הצדית של הסיבוב בקו רוחב 22.5° , שמושכת את הגוף לכיוון מישור המשווה (העומס הצדי). רק מעבר שרדיוסו גדול מכ-1,000 ק"מ עובר את המבחן הרדיאלי, ומעבר ברוחב כזה כבר אינו דק: הוא עצמו מכיל חומר בכמעט מחצית ממסת הירח ונושא כוח צדי בסדר גודל של 10^{22} ניוטון. המסקנה היא שהחיבור הוא חלק רחב, חם ומסיבי של כדור הארץ, וחלק C מראה מהו: האגס.

מהו האגס. האגס הוא בליטה אחת של כדור הארץ שנמשכה החוצה. הלחץ שהרים גבעה מעל המקור המשיך להרים אותה, והגבעה גדלה להמשך ארוך ורחב של חומרו של כדור הארץ עצמו: רחב בבסיסו על פני כדור הארץ — 9,000 עד 11,000 ק"מ, יותר מרדיוס כדור הארץ — ומצטרף בקו מעוקל וחלק אחד עד לקצהו, שנושא את הגוף. הוא חלק מכדור הארץ, והוא מוחזק בכבידה של כדור הארץ כמו כל חלק אחר של כדור הארץ. הוא אינו נזרק, משום שמהירותו אינה מהירות זריקה והוא נמצא כולו בתוך קו הקורוציה (C.7§). מסתו, הנגזרת מרוחב הבסיס שלו, היא כתשע עד שתיים-עשרה מסות ירח, והאנרגיה הדרושה כדי להרים אותו היא בסדר הגודל של האנרגיה שמשתחררת כאשר הברזל של כדור הארץ שוקע אל הליבה (C.9§).

מדוע השחרור מתרחש במקום שבו הוא מתרחש. האגס כולו נמצא בתוך קו הקורוציה, ושם המשיכה המשולבת של הכבידה והסיבוב מכוונת אל כדור הארץ, והאגס מוחזק שם בכבידה של כדור הארץ כחלק ממנו. הגוף שעל קצהו מתרומם איתו עד שמרכז המסה שלו מגיע לקו, ושם הוא מתחיל להיפרד. שם המהירות שכבר יש לו מהסיבוב עם כדור הארץ היא המהירות של מסלול מעגלי, ומעבר לקו הסיבוב מושך החוצה יותר משהכבידה מושכת פנימה; המגע מתנגד רק מעט, והגוף נמשך החוצה בכוח ומשתחרר כ-210 ק"מ מעבר לקו (C.5§). האגס נשאר בתוך הקו, חלק מכדור הארץ, ולאחר השחרור ההתמיינות אוספת אותו בחזרה אל כדור הארץ לאורך עשרות עד מאות מיליוני שנים.

מה המאמר מציג

הירח הוזן מבפנים והתרומם מבחוץ — גוף אחד, שנבנה בשתי דרכים בו-זמנית. מבפנים, עלייה מגמטית דחפה חומר עמוק אל גוף שעמד על כדור הארץ; הדחיפה מתומחרת, וגוף-אם במסה ובסיבוב האלה מחזיק 150 ג'יגה-פסקל במקור, די להרים התך מוקצף אל רדיוס הקורוציה עם עודף של 10 ג'יגה-פסקל. מבחוץ, הקליפה החיצונית של גוף-האם מעל האזור התרוממה עם הגוף כפני השטח של הכיפה העליונה שלו, והפכה לקרום הירח. הגוף ישב על הקצה הרחב של האגס כמו כדור פחוס על תמיכה מעוגלת; בצפיפות המוקצפת שהדחיפה דורשת, 1,300 ק"ג/מ"ק, הכיפה העליונה שלו עמדה כ-3,650 ק"מ מעל המגע של 6,000 ק"מ. הוא התעגל החוצה כשכל חלק שומר על חלקו בפני השטח, ולכן המגע הוא

כיפה בצד הקרוב של כ-31° והטבעת המתקלפת היא חגורה עד 70°; הוא נפחס והתעגל פנימה בעודו מחובר, ולכן הקטבים צפופים, והיה עגול בשחרור; וקרום הצד הרחוק שלו נבנה בשכבות, ולכן הוא עבה.

המנגנון מפרט במדויק את החיבור שלו, והחיבור משחרר את הגוף במקום שבו המסלול צריך אותו. מעבר צר וחסר מסה אינו יכול לעשות את העבודה: המאזן הרדיאלי עובר רק מעל רדיוס של כ-1,000 ק"מ, ובו המעבר כבר מכיל 0.46 מסות ירח ונושא עומס צדי של 10^{22} ניוטון. לכן החיבור הוא הבסיס הרחב של הכיפה — 3,000 ק"מ רוחב בשלב האחרון — וכדור הארץ שמתחתיו נמשך לאגס, חלק מכדור הארץ שמוחזק בכבידה של כדור הארץ; הגוף מתחיל להיפרד כאשר מרכז המסה שלו מגיע לקו הקורוטציה, בכ-16,400 ק"מ על המשווה וב-17,287 ק"מ ב-22.5°, ומשתחרר כ-210 ק"מ מעבר לו, נמשך החוצה בכוח, בסיוע הלחץ הפנימי — השחרור של מאמרים 2 ו-4 (C.7–C.8). כל דרישה שהדבר מציב להתך העמוק, לשחרור האנרגיה ולמבנה החיבור מפורטת ב-D.1§. הדרישות של המודל, ומה שיבחן אותן, מרוכזים במאמר 11 (הדרישות).

בליטה אחת, שנמשכה לאגס. הבליטה נמשכת לאגס מחומרו של כדור הארץ עצמו, שמוחזק בכבידה של כדור הארץ — ברוחב 9,000–11,000 ק"מ על פני השטח, ומצטר בקשת אחת עד לקצה ברוחב 6,000 ק"מ בהתחלה ו-3,000 ק"מ בשחרור; כתשע עד שתים-עשרה מסות ירח, שההתמיינות אוספת בחזרה אל כדור הארץ לאחר השחרור, בעוד שהגוף שעל הקצה מתעגל והופך לירח. צורת שיווי המשקל של אגס כזה היא החישוב שהמנגנון דורש כעת (C.7–C.9§).

איך לקרוא את התיבה. הפסקה הראשונה מציגה את שתי האספקות ואת מה שכל אחת מהן מסבירה בירח של היום. הכיפה בצד הקרוב, של כ-31°, היא הכתם בגוף שהיה המגע של 3,000 ק"מ עם האגס: הוא לא היה מכוסה כולו עד השחרור: Serenitatis התקלפה ממנו ראשונה, ו-Imbrium נשארה מחוברת עד הניתוק. החגורה בין 31° ל-70° היא טבעת הכיפה התחתונה שהתקלפה מכדור הארץ במהלך ההתעגלות החוצה, ולקחה איתה את הסיאל שעליו ישבה. כל מה שמעבר ל-70° הוא הכיפה העליונה: קליפה מההתחלה, חשופה מהשלב השטוח ונושאת עמה את המכתשים שלה כלפי מעלה (B.4§). ההתעגלות פועלת כמו כדור פחוס מעט שהופך לעגול: כל כתם בפני השטח שלו מצטמצם באותו יחס, כך ששום אזור אינו זז ביחס לאחר. הפחיסות שבאה אחר כך היא הסיבוב שמשטיח את הגוף בקטבים שלו; ההתעגלות פנימה היא הגוף שחוזר להיות עגול כשהוא מתהדק. במהלך ההתעגלות פנימה פני השטח הקוטביים נמשכו פנימה יותר מכל, בעוד שהמכתשים שכבר היו עליהם שמרו על גודלם, ולכן הם נדחסו זה לזה ליד הקטבים (מאמר 7). השינויים האלה התרחשו כשהגוף היה מחובר: יחס הצירים הגיע ל-1.69 בשיא הפחיסות וירד ל-1.2 בשלב מאוחר של תקופת החיבור (מאמר 7), ועד השחרור הגוף היה עגול, הקליפה החיצונית שלו קשיחה, ויחס הצירים שלו לכל היותר 1.04 (מאמר 2, B.7§).

הפסקה השנייה מנסחת את התנאי על החיבור ואת תוצאתו. השלישית מתארת מה עולה בגורל האגס. האגס אינו אובד בשחרור; לאחר השחרור ההתמיינות אוספת אותו בחזרה אל כדור הארץ, בהדרגה, לאורך עשרות עד מאות מיליוני שנים. החלק הכבד שלו — כולל רוב הברזל שעלה אליו (C.10§) — שוקע עמוק אל תוך כדור הארץ מתחת לבסיס האגס (חלק E); הצד הקדמי שלו נאסף אל הפסים של צפון האוקיינוס השקט, והגב שלו אל הקשתות של מערב האוקיינוס השקט (מאמר 9, *The Stripes* — הפסים). המסה אינה עוזבת את כדור הארץ; היא עוברת מגובה רב בחוץ אל עומק רב בפנים. הטווח שלה, תשע עד שתים-עשרה מסות ירח, נקבע על ידי רוחב הבסיס, 9,000 עד 11,000 ק"מ, ונגזר ב-C.7§.

מבוא — גוף אחד, שתי אספקות

במודל, גוף-האם אינו משליך ירח מוגמר. הגוף המחובר גדל ונע החוצה תוך שהוא מקבל חומר משני מקורות בו-זמנית: חומר עמוק עולה אליו דרך עלייה מגמטית, והקליפה החיצונית של גוף-האם — השכבה הסיאלית מעל אזור הבנייה — מתרוממת איתו כפני השטח שלו. מאמר 2, *LEF Mechanism in Principle* (מנגנון LEF בעיקרון), הראה שברדיוס הקורוציה המהירות שכבר יש למסה בקורוציה היא המהירות שמסלול חופשי דורש, ושמאזן התנע הזוויתי של גוף-האם מאפשר את ההעברה. במילים אחרות, מאמר 2 הראה היכן הירח היה צריך להשתחרר, ושלכדור הארץ היה די סיבוב כדי להביא אותו לשם. המאמר הזה שואל כיצד המסה הגיעה לרדיוס הזה ומה תמך בה לאורך הדרך.

שני המקורות תורמים לאותו גוף. הקליפה נוסעת אל הגוף: היא מתרוממת עם האגס, ובמקביל נפרדת לאט וגולשת כלפי מעלה אל קצהו, אל תוך הגוף, ושם היא הופכת לעור שלו; הגלישה מוקלת בזכות השכבה ה"משומנת" שבין הסיאל לסימה (C.10§). אזור הבנייה הוא כיפה, הכיפה מתרוממת, ופני השטח שלה עולים איתה: הקרום הוא של כדור הארץ, הוא נשא את המכתשים שלו אל הירח, ובצד הרחוק הוא נבנה בשכבות. זו הסיבה שמאמר אחד עוסק בשתי האספקות: הן אינן שני מנגנונים שמתחרים על הסבר הירח, אלא הפנים והחוץ של גוף אחד שגדל.

הקורוציה מספקת קשר בין הסיבוב לבין המהירות המסלולית. היא אינה מרימה חומר — האגס מרים — אבל היא זו שמנתקת את הירח: כשמרכז המסה של הירח מגיע לקו, כוחות הקורוציה מושכים אותו לחופשי. חומר על פני כדור הארץ מסתובב איתו, אבל לאט בהרבה ממה שמסלול דורש; משהו צריך לשאת אותו החוצה ולהחזיק אותו שם עד שהוא מגיע לרדיוס הקורוציה. לשם כך דרושים לחץ מניע, מאזן מסה ואנרגיה, מבנה שמאפשר זרימה, וחיבור שמסוגל לשאת את העומס הנדרש. אנו בוחנים אותם בארבעה חלקים: A, ההזנה מבפנים — בעיית ההובלה, המקור, הגבולות התרמיים, והאם הלחץ, הקצב והאנרגיה מספיקים; B, ההתרוממות מבחוץ — ארבעת שלבי הכיפה, הגאומטריה שלה ומה היא הופכת להיות; C, החיבור והשחרור — העומסים שהוא נושא, וכיצד הגוף מתחיל להיפרד בקו הקורוציה ומשתחרר מעט מעבר לו; D, תחזיות, מבחנים ומסקנות. חלק C עוקב גם אחר האגס שיוצר את החיבור, אחר ממה עשוי הגוף, ואחר החומר שכדור הארץ המשיך להשליך לאחר השחרור. חלק חמישי, E, עוקב אחר האגס בחזרה אל כדור הארץ, מתעד היכן עמד בסיסו ביחס לכדור הארץ העמוק כפי שהוא נראה היום, ושואל מה עשה לפנים כדור הארץ; סעיף מסכם מרכז כיווני מחקר להמשך.

החידוש הוא צירוף התהליכים לבנייה מקושרת אחת. חוקי הכבידה, הזרימה, הולכת החום וההידבקות הצמיגה הם הפיזיקה שבה המנגנון נבחן, ולא ראייה עצמאית לכך שהוא התרחש. כל אחד מהחוקים האלה סטנדרטי; מה שהמאמר מוסיף הוא היישום שלהם על גוף אחד ברצף אחד, עם המספרים של סביבה עקבית אחת, כך שאפשר לבדוק כל שלב מול השלב שאחריו.

חלק A — מבפנים: בעיית ההובלה ומאזן החומר

הבעיה

כיצד מצטרף חומר עמוק אל גוף הגדל מעל פני השטח של כדור הארץ? בחלק זה אנו מגדירים את הגוף המוזן ואת הכוחות הנדרשים, לפני שנבדוק אם הלחץ יכול לספק אותם.

מאמר 2, מנגנון LEF בעיקרון, הראה היכן אפשר לשחרר את הירח — ברדיוס הקורוטציה, כלומר המרחק שבו גוף שמסתובב עם כדור הארץ כבר נע במהירות של מסלול חופשי — והראה שהתנע הזוויתי של כדור הארץ מספיק כדי להציב שם חומר. הוא לא הראה כיצד הגיע החומר לשם. חלק זה עוסק בשאלה הזאת מתוך פנים כדור הארץ. תחילה הוא מנהל חשבון של המסה (A.1§), אחר כך מסביר מדוע הסיבוב של כדור הארץ לבדו אינו יכול להרים את הגוף (A.2§), ולבסוף כותב את מאזן הכוחות שכל הזנה מן העומק חייבת לקיים (A.3§). הסעיפים שאחריו מתארים את המקור, את המעבר ואת הגבולות התרמיים (A.4–A.8§), וההמשך הבא של חלק זה מצמיד מספרים ללחץ, לקצב ולאנרגיה (A.9–A.13§).

A.1 גוף שגדל תוך כדי תנועה

הצעד הראשון הוא הנהלת חשבונות. לפני שמחשבים כוח כלשהו, יש לדעת לומר היכן נמצא כל קילוגרם בכל רגע, כך ששום מסה לא תיספר פעמיים ושום מסה לא תיעלם מהחשבון.

בתחילת חשבון המסה חומר הירח כלול בגוף האם: במצב ההתחלתי יש גוף אחד בלבד, גוף האם, שמסתו M_0 . ככל שהבנייה מתקדמת, המסה הזאת מתחלקת בין ארבעה מאגרים. כשמבחינים בין מאגר ארצי, גוף מתפתח וחומר הנמצא בדרך, המאזן הוא:

$$M_0 = M_E(t) + m(t) + M_{\text{transit}}(t) + M_{\text{escaped}}(t).$$

במילים: בכל זמן t , המסה ההתחלתית שווה למסה שעדיין נמצאת בכדור הארץ, $M_E(t)$, ועוד המסה שכבר (1) נמצאת בגוף המתפתח, $m(t)$, ועוד המסה שבדרך ביניהם (בחיבור, או שנזרקה למעלה ועדיין לא נחתה), $M_{\text{transit}}(t)$, ועוד מה שעזב את המערכת לגמרי, $M_{\text{escaped}}(t)$. המשוואה היא פשוט שימור מסה; תועלתה בכך שהיא מכריחה כל קילוגרם להימצא במקום אחד בדיוק.

המסה המצטברת בגוף מקיימת:

$$\frac{dm}{dt} = \dot{M}_{\text{int}} + \dot{M}_{\text{ext}} - \dot{M}_{\text{out}}.$$

משוואה (2) אומרת באיזה קצב הגוף גדל. נקודה מעל מסה מציינת קצב, בקילוגרמים לשנייה. $\dot{M}_{\text{int}}$ היא (2) ההזנה הפנימית — חומר עמוק המגיע מלמטה דרך החיבור; $\dot{M}_{\text{ext}}$ היא ההיטמעות של הקליפה העולה יחד עם הגוף (חלק B) — השכבה החיצונית של כדור הארץ, שהופכת לעור של הגוף; ו- $\dot{M}_{\text{out}}$ היא היציאה מן הגוף, החומר הנזרק החוצה דרך הפתחים שלו. מסת הגוף גדלה במה שנכנס מבפנים ומבחוץ, פחות מה שיוצא.

חומר שיוצא וחוזר נרשם בהתאם בשני הקצבים: מנה של חומר שנפלטה דרך פתח מופחתת כשהיא יוצאת, ומתווספת שוב כשהיא נוחתת בחזרה על הגוף. לכן אין לזהות כל יציאה עם בריחה מן המערכת; רוב החומר הנפלט נשאר בחשבון כחומר בדרך, וחוזר. החלק הפנימי של הירח הסופי — כמה ממנו הגיע מן העומק ולא מן הקליפה העולה — נקבע מן האינטגרל של ההזנה ושל האובדנים לאורך כל הבנייה, ולא מהנחה של אחוז קבוע. (חלק B.7 דן בחלוקה הזאת.)

A.2 מדוע הסיבוב אינו ההובלה עצמה

השאלה שסעיף זה עונה עליה היא מדוע הירח לא יכול היה פשוט להיזרק מכדור הארץ המסתובב, ומדוע לכן משהו חייב לשאת אותו החוצה.

מאמר 2 (A.1.28) נתן את הסיבה לכישלון של גוף נזרק. בקו המשווה של גוף אם המשלים סיבוב אחד ב-5.5 שעות, הקרקע נעה בכ-2,133 מ"ש, ואילו מסלול חופשי ממש מעל פני השטח דורש כ-7,701 מ"ש. חומר המשוחרר מפני השטח, או נזרק מהם למעלה, נע הצידה לאט מדי מכדי להישאר במסלול: מסלולו הוא אליפסה קצרה שחוזרת אל תוך גוף האם, והוא נופל בחזרה. רק ברדיוס הקורטציה, כ-15,818 ק"מ מהמרכז ביממה של 5.5 שעות, מגיעה המהירות של הסיבוב יחד עם כדור הארץ למהירות של מסלול. לכן יש להביא את החומר למרחק הזה בעודו מחובר ובעודו מסתובב עם כדור הארץ. את ההבאה הזאת אנו מכנים *הובלה*: אספקה רציפה של חומר עמוק, הנדחף למעלה ממקור בתוך כדור הארץ דרך חיבור אל הגוף הגדל — ולא זריקה אחת.

התנגדות טבעית היא שהסיבוב המהיר של כדור הארץ אולי עושה את ההרמה בעצמו. דוגמת ההעמסה הבאה בודקת זאת. בדוגמה של גוף בעל מסת הירח המלאה ורדיוס שקול של 2,270 ק"מ (הרדיוס של כדור בעל מסת הירח בצפיפות הנמוכה של 1,500 ק"ג/מ"ק), הנוגע בגוף אם שרדיוסו המשווני 6,721 ק"מ, המרחק בין המרכזים הוא 8,991 ק"מ — סכום שני הרדיוסים. (בשלב 2 של חלק B אותה מסה יושבת על קצה האגס כגוף פחוס מעל אזור מגע ברוב 6,000 ק"מ; דוגמת ההעמסה נשמרת בצורה הכדורית לשם השוואה עם מאמר 2.) במרחק הזה אנו משווים שתי תאוצות במרכז הגוף: המשיכה הכבידתית של כדור הארץ פנימה, והתאוצה הצנטריפוגלית החוצה שהסיבוב מקנה לגוף המסתובב עם כדור הארץ. שימוש ב- M_E ובסיבוב של 5.5 שעות נותן בקירוב:

$$g_E = 4.93 \text{ m s}^{-2}, \quad \omega^2 r = 0.905 \text{ m s}^{-2}.$$

כאן $g_E = GM_E/r^2$ היא משיכת כדור הארץ ב- $r = 8,991$ ק"מ, כאשר G הוא קבוע הכבידה, ו- $\omega^2 r$ היא (3) התאוצה הצנטריפוגלית, כאשר ω היא המהירות הזוויתית של סיבוב בן 5.5 שעות (2π חלקי זמן המחזור בשניות). זו ההשוואה שמרגישה ילדה על קרוסלה מסתובבת: ככל שהקרוסלה מסתובבת מהר יותר וככל שהיא עומדת רחוק יותר מהמרכז, כך היא נדחפת החוצה בחוזקה רבה יותר. ב-8,991 ק"מ הדחיפה החוצה קטנה מחמישית מהמשיכה פנימה. השתיים היו שוות רק ברדיוס הקורטציה, שבו המשיכה נחלשה כריבוע המרחק והאיבר הצנטריפוגלי גדל ביחס ישר אליו.

התאוצה פנימה שנותרת היא כ-4.03 מ"ש² (4.93 פחות 0.905): כל קילוגרם של הגוף עדיין שוקל, לעבר כדור הארץ, כשתי חמישיות ממה שהיה שוקל על פני כדור הארץ היום. זוהי דוגמת העמסה מוגדרת, ולא תיאור של בליטה זעירה בתחילת הבנייה. היא מראה מדוע נדרש מנגנון נוסף המעביר כוח ואנרגיה: הסיבוב לבדו אינו מספק תמיכה במצב הזה. הסיבוב מקל את העומס; הוא אינו נושא אותו.

ציפה יכולה להניע חומר קל בתוך חומר צפוף ממנו, כמו שמן העולה דרך מים. אבל ציפה זקוקה לתווך צפוף יותר שסביבה כדי לדחוף כנגדו, ומעל פני השטח של גוף האם אין תווך כזה; לכן מעבר אל מעל פני השטח של גוף האם מחייב פתרון הכולל את הצורה החיצונית ואת החיבור. המנגנון הנבחן כאן הוא הזנה רציפה תחת לחץ: חומר עמוק נדחף למעלה בלחץ של פנים גוף האם, דרך חיבור, אל הגוף. אין צורך לשלול כל מנגנון פליטה אחר כדי לבחון את המנגנון הזה. המאמר שואל אם המנגנון האחד הזה עובד, ומעמיד אותו למבחנים כמותיים.

A.3 מה מניע את החומר

משנקבע המנגנון, אנו כותבים את המאזן שהוא חייב לקיים. השאלה היא כמה לחץ דרוש כדי לדחוף חומר מן העומק במעלה מסלול אל הגוף.

במערכת ייחוס המסתובבת בקצב קבוע — כלומר, כפי שרואה זאת צופה המסתובב עם כדור הארץ — אפשר לצרף את הכבידה ואת ההשפעה הצנטריפוגלית לגודל אחד, הפוטנציאל האפקטיבי. פוטנציאל הוא האנרגיה

לקילוגרם שיש למנת חומר בגלל מקומה; חומר נוטה לנוע מפוטנציאל גבוה לנמוך, כמו מים הזורמים במורד. הפוטנציאל האפקטיבי הוא:

$$\Phi_{\text{eff}} = \Phi_{\text{grav}} - \frac{1}{2} \omega^2 r^2,$$

כאשר Φ_{grav} הוא הפוטנציאל הכבידתי, ω המהירות הזוויתית, ו- r המרחק מציר הסיבוב. האיבר השני הוא (4) התרומה הצנטריפוגלית: הוא מוריד את הפוטנציאל ככל שמנת החומר רחוקה יותר מהציר, ולכן הסיבוב מקל על הטיפוס החוצה. הרמת חומר החוצה במערכת הזאת פירושה טיפוס במדרון של Φ_{eff} , מדרון שנעשה מתון יותר עם המרחק ונעשה שטוח ברדיוס הקורטציה.

לאורך מסלול הזנה איטי, רכיב מאזן הכוחות הוא בקירוב:

$$\frac{dp}{ds} = -\rho \frac{d\Phi_{\text{eff}}}{ds} - \mathcal{R}_{\text{visc}},$$

כאשר s הוא המרחק הנמדד לאורך המסלול, p הלחץ, ρ צפיפות החומר שבמסלול, ו- $\mathcal{R}_{\text{visc}}$ מייצג את (5) ההתנגדות לזרימה ליחידת אורך — החיכוך של חומר צמיג הנע בתעלה. משוואה (5) אומרת שלאורך המסלול הלחץ חייב לרדת בשני סכומים ליחידת אורך: משקל החומר בשדה האפקטיבי (האיבר הראשון), והחיכוך של הנעתו (האיבר השני). האיבר הראשון הוא הכלל המוכר שהלחץ גדל עם העומק תחת משקל החומר שמעל; הלחץ הדרוש כדי להחזיק עמוד כנגד הכבידה האפקטיבית נקרא העומד ההידרוסטטי שלו. יש לשים לב שהעומד יחסי לצפיפות ρ : חומר קל יותר צריך פחות לחץ כדי להתרומם לאותו מרחק. זו הסיבה שצפיפות החומר העולה הופכת לגודל המכריע ב-A.10§.

הפרש הלחצים חייב לשאת את עומד הכבידה האפקטיבית, את ההתנגדות ואת העומס בגבול המקבל — משקל הגוף הלוחץ מלמעלה על ראש ההזנה. משוואה זו מבטאת את מאזן התנע של הרצף לאורך מסלול ההזנה; בקצב סיבוב משתנה ובזרימה תלת-ממדית יש לכלול גם תאוצות ואת התנע הנישא עם החומר [1]. בהזנה האיטית והיציבה הנבחנת כאן האיברים האלה קטנים, ומשוואה (5) היא הצורה שבה משתמש מבחן הלחץ של A.9§.

חלק A (המשך) — מקור עמוק, גוף מתפתח וגבולות תרמיים שונים

הבעיה

משהגדרנו הזנה תחת לחץ, עלינו להסביר כיצד היא נשארת מרוכזת ומזינה גוף אחד. אנו בוחנים את הגיאומטריה של המקור ושל החיבור, ואת ההבדל בין פני השטח החיצוניים לבין האזור החם המזין אותם.

הסעיפים הקודמים קבעו שהגוף חייב להיות מוזן מן העומק תחת לחץ. ההמשך הזה שואל שלוש שאלות מעשיות על ההזנה: מאין בתוך כדור הארץ היא באה ומדוע היא נשארת ממוקדת במקום אחד (A.4§); מה שומר על המעבר פתוח (A.5§); וכיצד יכול לגוף להיות חוץ המתחזק בעוד פנימו וההזנה שלו נשארים חמים וניידים (A.6–§ A.7). הוא מסתיים בסדר שבו מתרחשים השלבים (A.8§).

A.4 מקור ההזנה והארגון הפנימי

הזנה שהייתה נודדת על פני כדור הארץ הייתה בונה תלוליות קטנות רבות, ולא ירח אחד. לכן המקור חייב להיות מרוכז, ולהזין את אותו אזור של פני השטח לאורך זמן רב.

השערת העבודה היא שההזנה התרכזה באזור אחד של פנים כדור הארץ בזמן שהפנים התארגן מחדש; האזור הזה שכן מצפון לקו המשווה (B.1§). בכדור הארץ הצעיר שקע הברזל ויצר את הליבה, והפנים נפרד לשכבות; במהלך ההתארגנות הזאת הפנים לא היה חייב להיות סימטרי. אי-אחידות בהרכב, בטמפרטורה ובפיזור החומר הצפוף יכולה לשנות את הלחץ ואת נתיבי הזרימה. במודל, אי-אחידות זו יכולה לקיים הזנה ממושכת לאותו אזור של פני השטח: חומר חם וקל יותר מתקבץ בצד אחד וממשיך לעלות מתחת לאותו מקום, כמו סיר המחומם שלא במרכזו וממשיך לרתוח באותה נקודה.

אזור הזנה מרוכז מסוג זה אינו נובע מעצם קיומו של מיון. כדי לבחון אותו יש לחשב את הפוטנציאל של פיזור המסה ואת תגובתו להזנה. גם חלוקה מחדש של החומר הצפוף וגם העברת מסה החוצה משנות את מומנט ההתמד — המדד לכמה רחוק מציר הסיבוב יושבת המסה — ולכן משנות את הסיבוב. ברזל השוקע פנימה גורם לכדור הארץ להסתובב מהר יותר, כמו מחליקה שמקרבת את זרועותיה; מסה הנישאת החוצה מאטה אותו. מסיבה זו משתמשים במצבים המצומדים של מאמר 2 ולא בסיבוב קבוע לאורך כל התהליך: היממה מתארכת רק מ-5.5 ל-5.77 שעות עד השחרור, משום ששתי ההשפעות מקזזות זו את זו במידה רבה (מאמר 2, A.4§).

ככל שהגוף גדל, הכבידה שלו עצמו מתחילה להיות משמעותית. הכבידה של הגוף המתפתח נעשית חשובה יותר ויותר עבור חומר הנמצא בקרבתו:

$$g_{\text{self}} = \frac{Gm(t)}{R_b(t)^2}.$$

כאן $m(t)$ היא מסת הגוף בזמן t ו- $R_b(t)$ הרדיוס שלו; g_{self} היא התאוצה לעבר מרכז הגוף עצמו, כפי (6) שהיא מורגשת על פני השטח שלו. היא גדלה ככל שהמסה מצטברת, ובגוף הסגור ברדיוס 1,890 ק"מ היא מגיעה ל-1.37 מ"ש² (חלק B.3). היא יכולה למשוך חומר נכנס ולעצב את הגוף: חומר נפלט שחוזר נוחת בחזרה עליו, וחומר מושך את עצמו לעבר צורה מעוגלת. עם זאת, כוחות פנימיים אינם מאיצים את מרכז המסה של הגוף עצמו. אי אפשר להרים את עצמך במשיכה בשרוכי הנעליים: כל משיכה פנימית בין שני חלקים של הגוף

מאוזנת במשיכה שווה והפוכה, והשתיים מבטלות זו את זו. ההרמה הכוללת עדיין מחייבת חילופי כוח ותנע עם הסביבה — עם כדור הארץ, דרך החיבור וההזנה.

A.5 מה שומר על מעבר פתוח

מאגמה מותכת העולה דרך גוף קר יותר נוטה לקפוא ולחסום את דרכה. הדרך אינה תעלה בעלת דפנות: האגס עצמו הוא המעבר המקשר בין פנים כדור הארץ לבין הגוף. סעיף זה קובע מה שומר על המעבר הזה פתוח, ומה הדבר הזה מספק ומה אינו מספק.

החיבור מקבל חום מן ההזנה ומן הגופים החמים שסביבו: המאגמה העוברת דרכו נושאת חום מן העומק למעלה, וגוף האם שמתחת והגוף הגדל שמעל חמים שניהם. פני השטח החיצוניים, הנמצאים במגע עם הסביבה הקרה, יכולים לאבד חום ולהתחזק באותו זמן. לכן למערכת יכולים להיות פנים נייד וחוזק יותר, וצמיגות משתנה ביניהם. צמיגות היא ההתנגדות של חומר לזרימה — דבש צמיג יותר ממים; לפנים חם יש צמיגות נמוכה והוא זורם בקלות, לחוץ שהתקרר — צמיגות גבוהה, והוא שומר על צורתו.

חימום משני צדי החיבור עוזר למנוע קפיאה מקומית, אך אינו כוח תוחם כשלעצמו: החום שומר על הדרך נוזלית, אך אינו תוחם אותה כשלעצמו; הדרך היא הפנים החם של האגס. צורת המעבר חייבת לקיים מאזן של לחצים ומאמצים צידיים, כנגד הכבידה, הסיבוב והזרימה. היציבות התלת-ממדית של המבנה המחובר היא דרישה שהמנגנון מציב לעצמו; חישוב הלחץ של A.9–A.13§ הוא הראשון במבחניה, ו-D.1§ מונה את השאר.

A.6 נדיפים, אטמוספירה וקירור החוץ

שתי תכונות של כדור הארץ הצעיר מעצבות גם את צפיפות החומר העולה וגם את האופן שבו החוץ מתקרר: החומרים הנדיפים שהחזיק, והאטמוספירה שהם יצרו.

נדיפים הם החומרים שהופכים בקלות לגז — בעיקר מים, ולצידם פחמן דו-חמצני ותרכובות דומות. בעומק, תחת לחץ, הם נשארים מומסים במאגמה, כמו פחמן דו-חמצני שנשאר מומס בבקבוק סגור. בתרחיש הנבחן קיים מלאי נדיפים קדום הגדול מהמלאי שנותר היום. בהקלת לחץ — כשהמאגמה עולה והלחץ עליה יורד — הנדיפים עשויים להשתחרר מן המאגמה ולשנות את צפיפותה ואת התנהגותה, כמו בבקבוק שמקציף כשפותחים אותו. מאגמה מלאה בבועות גז היא מאגמה מוקצפת. צפיפותה נמוכה בהרבה מזו של אותה מאגמה ללא בועות, משום שחלק מנפחה הוא גז.

הצפיפות הנמוכה הזאת היא שמאפשרת את ההזנה. לפי משוואה (5), הלחץ הדרוש להרמת חומר יחסי לצפיפותו: מאגמה מוקצפת צריכה דחיפה קטנה בהרבה כדי להגיע לאותו גובה מאשר מאגמה צפופה. חלק A.10 הופך זאת לסף — לחץ המקור של גוף האם יכול להרים מאגמה עמוקה עד רדיוס הקורוטציה רק אם היא קלה מכ-3,864 ק"ג/מ"ק — וחלק B.2 מוצא שלגוף על קצה האגס יש הצפיפות המוקצפת של כ-1,300 ק"ג/מ"ק. תפקיד הנדיפים הוא להוריד את צפיפות החומר העולה, ולא להעלות את לחץ המקור מעל הערך הליתוסטטי (הלחץ שקובע משקל החומר שמעל); ואין להניח בועות בכל העומקים, משום שבעומק רב הנדיפים עשויים להיות עדיין מומסים.

נוכחות מים בתכלילים ירחיים — טיפות זעירות של מאגמה שנלכדו בתוך גבישים של חומר געשי ירחי ושמרו על המים המקוריים שלהן — מספקת אילוץ על חלק ממקורות המאגמה של הירח; היא אינה מוודדת את מלאי הנדיפים הכולל בזמן הבנייה [2]. היא מראה שחלק מחומר המקור של הירח לא היה יבש, בלי לקבוע כמה מים החזיקה המערכת כולה.

מחזור של עלייה, התקררות וחזרה עשוי להעביר חום מן החומר אל הסביבה: חומר שנזרק למעלה דרך הפתחים מאבד מעט חום במעופו, אך נוחת כשהוא עדיין חם. עם זאת, קירור המערכת כולה מחייב שאנרגיה תעזוב אל החלל; חום שעבר מן החומר אל סביבתו עדיין לא אבד. אטמוספירת אדים יכולה גם להגביל את הקרינה היוצאת:

אדי מים בולעים את הקרינה האינפרא-אדומה שבאמצעותה פני שטח חמים מתקררים, ולכן אטמוספירת קיטור עבה פועלת כשמיכה, ואי אפשר למדל את כל פני השטח כאילו היו חשופים לריק. חישובים של אטמוספירה רוויה מראים גבול קרינה בתנאים מסוימים — תקרה לשטף החום שגוף מכוסה קיטור יכול להקרין החוצה; אי אפשר להחיל שטף קבוע מן החישובים האלה על כל גובה ושלב בתרחיש זה [3], משום שהאטמוספירה, הטמפרטורה והכבידה משתנות כולן ככל שהגוף עולה.

7.A מעטה מתקרר מעל בסיס נייד

הגוף זקוק לעור מוצק בזמן שפניו וההזנה שלו נשארים מותכים. סעיף זה מעריך באיזו מהירות נוצר עור כזה. חזית קפיאה היא הגבול בין השכבה המוצקה שנוצרה בפני השטח הקרים לבין המאגמה שמתחתיה; ככל שחום עוזב דרך המוצק, החזית מתקדמת כלפי מטה והשכבה המוצקה מתעבה. לכיפה הקפואה יש חשיבות לשרידות התרמית של הגוף: משנוצרה, היא עומדת בין המאגמה החמה לבין החוץ הקר, ומאחר שחום יכול לעזוב רק בהולכה דרכה, ככל שהיא מתעבה המאגמה שמתחתיה מאבדת חום לאט יותר. כך הכיפה מגינה על הפנים הנייד שההזנה דורשת, ובעצמה הופכת לגבול החיצוני החזק.

הערכה פשוטה בהולכה להתקדמות חזית קפיאה היא:

$$h_{fr}(t) \simeq \sqrt{\frac{2k\Delta T t}{\rho_s L_f}}$$

כאן h_{fr} הוא עובי השכבה המוצקה אחרי זמן t ; k הוא מקדם הולכת החום של המוצק — עד כמה בקלות הוא (7) מעביר חום; ΔT הוא הפרש הטמפרטורות לרוחב השכבה המוצקה, בין המאגמה בבסיסה לבין החלק העליון הקר; ρ_s היא צפיפות המוצק; ו- L_f הוא החום הכמוס של ההתכה — החום שיש להוציא מכל קילוגרם של מאגמה כדי להקפיא אותו, בלי שום שינוי בטמפרטורה שלו. המשוואה אומרת שהעובי גדל כשורש הריבועי של הזמן. הסיבה היא ההשפעה המגינה שתוארה זה עתה: ככל שהמוצק עבה יותר, פחות חום עובר דרכו, והשכבה הבאה קופאת לאט יותר. הכפלת העובי לוקחת פי ארבעה זמן; שכבה עבה פי חמישים לוקחת פי 2,500 זמן.

זהו קירוב חד-ממדי של מאזן חום כמוס, עם הפרש טמפרטורות קבוע והולכה דרך השכבה הקפואה. הצבת $L_f = 4 \times 10^5 \text{ J kg}^{-1}$, $\rho_s = 3000 \text{ kg m}^{-3}$, $k = 3 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ — ערכים אופייניים לחומר סיליקטי — נותנת את הזמנים הבאים. שתי העמודות הן שתי בחירות של הפרש הטמפרטורות: 1,200 K, לפני שטח המתקררים בחוזקה, ו-100 K, לפני שטח הנשמרים חמים, למשל בידי אטמוספירת אדים או סביבה חמה (A.6§).

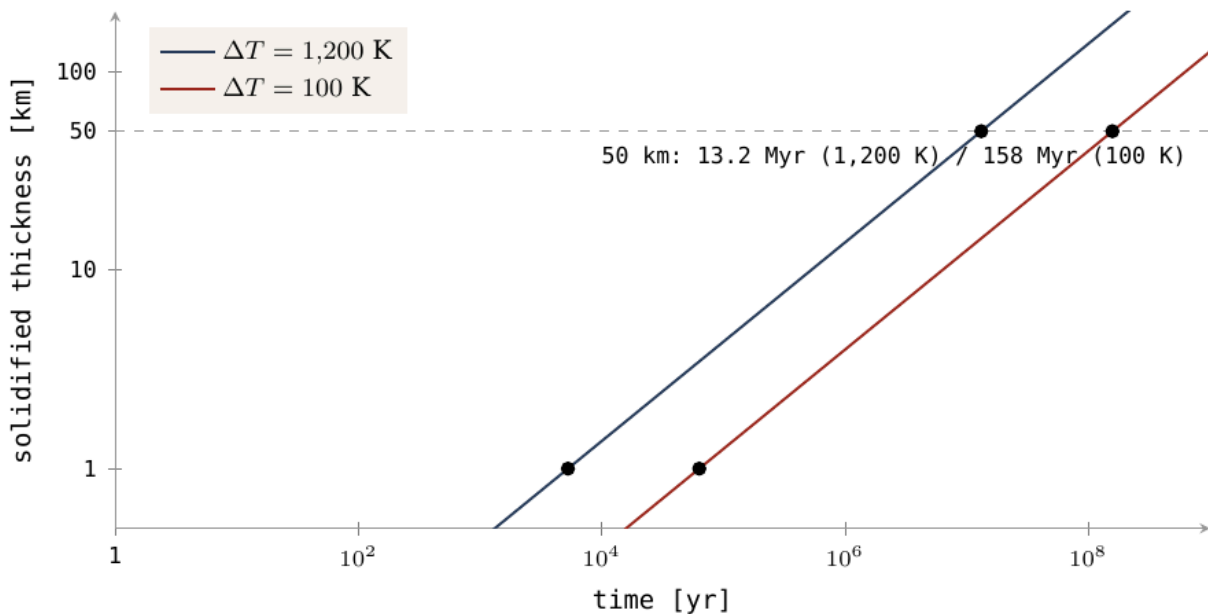
עובי שהתמצק	$\Delta T = 100 \text{ K}$	$\Delta T = 1200 \text{ K}$
מטר אחד	כ-1.9 ימים	כ-23 ימים
קילומטר אחד	כ-5,280 שנים	כ-63,400 שנים
50 ק"מ	כ-13.2 מיליון שנים	כ-158 מיליון שנים

טבלה: הזמן להתמצקות שכבה בעובי נתון לפי משוואה (7), בשני הפרשי טמפרטורות.

את הטבלה קוראים במורד כל עמודה ככל שהמוצק גדל, ולרוחב כל שורה ככל שהקירור נחלש. במורד עמודה הזמנים עולים בתלילות: מטר של מוצק נוצר בתוך ימים, קילומטר בתוך אלפי שנים, חמישים קילומטרים בתוך מיליוני שנים. לרוחב שורה, כל זמן ארוך פי שנים-עשר במקרה החם, משום שהזמן להגיע לעובי נתון הפוך ביחס ל- ΔT . המטר הראשון נוצר אפוא כמעט מיד, יהיו התנאים אשר יהיו; קליפה עבה — לא.

הטבלה מדגימה רגישות לתנאי השפה. היא אינה קובעת את העובי הסופי, משום שהזנה חמה, הסעה פנימית, אטמוספירה ומאגר חום סופי משנים את הפתרון: הזנה חמה המגיעה מלמטה מתיכה מחדש את בסיס המוצק, הסעה מובילה אליו חום, אטמוספירה מקטינה את ΔT , וגוף בעל מאגר חום מוגבל מתקרר בסופו של דבר כולו.

הקשיחות הגאותית של גוף בגודל הירח — יכולתו לעמוד בפני עיוות בידי הגאות של כדור הארץ — מסופקת על ידי הקליפה של חלק B, ולא על ידי המטר הראשון הזה.



איור 1. התקדמות חזית קפיאה בהולכה, משוואה (7), עם $k = 3$, $\rho_s = 3,000$ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, $L_f = 4 \times 10^5$ J/kg . הנקודות: הטבלה של A.78. ההערכה מדגימה רגישות לתנאי השפה; היא אינה קובעת את העובי הסופי. (בשרטוט: ציר אופקי — זמן בשנים; ציר אנכי — עובי שהתמצק בק"מ; שני הצירים לוגריתמיים; קו כחול כהה — $\Delta T = 1,200$ K; קו אדום — $\Delta T = 100$ K; הקו המקווקו — 50 ק"מ: 13.2 מיליון שנים (1,200 K) / 158 מיליון שנים (100 K)).

איור 1 מציג את אותו חוק על פני כל טווח הזמנים. שני הצירים לוגריתמיים, ולכן חוק של שורש ריבועי נראה כקו ישר העולה מדרגה אחת בעובי על כל שתי מדרגות בזמן. הקו הכחול הכהה (קירור חזק) והקו האדום (פני שטח חמים) מקבילים: המקרה החם מגיע לכל עובי מאוחר יותר באותו גורם. הקו המקווקו מסמן 50 ק"מ, עובי לדוגמה, והנקודות הן ערכי הטבלה.

הקרום של הצד הרחוק של הירח בנוי, בין היתר, מן הקליפה הסיאלית העולה כפני השטח של הכיפה — השכבה החיצונית הקלה של גוף האם, העשירה בצורן ובאלומיניום. החומר הפנימי, שהגיע אל הירח מתוך כדור הארץ דרך ההזנה, קפא עם הזמן ונשאר במרכז הירח ובחלקו הקרוב. חלק B בוחן את תרומתם היחסית ואת הגיאומטריה של הכיפה. כאן נדרש רק שהגבול החיצוני יוכל להתחזק בזמן שמעבר ההזנה נשאר נייד, וההערכה מראה שהוא יכול: עור מוצק נוצר בתוך ימים, ואילו המאגמה שמתחתיו, מבודדת על ידו ומוזנת מחדש מלמטה, נשארת נוזלית.

A.8 סדר הבנייה

רכיבי חלק A פועלים יחד, וסדרם חשוב, משום שצעד שיבוא שלא במקומו היה סותר את הרישום שהגוף נושא. בתרחיש זה, ההזנה הפנימית והתרוממות הכיפה חופפות בזמן, בעוד פליטות דרך הפתחים עדיין מתרחשות: הגוף מוזן מלמטה, הקליפה שלו עולה יחד איתו, וחומר נזרק החוצה דרך הפתחים וחוזר — הכול בבת אחת. הפליטות אינן פוסקות כל זמן שהגוף מחובר: הן הולכות ופוחתות ככל שהאגס גדל והגוף מתרחק ממרכז כדור הארץ, והן נפסקות בניתוק, כשהגוף מנותק מן הלחץ של כדור הארץ. לסגירת הקליפה החיצונית אין בכך תפקיד. הרצף כולו, מתחילת הבליטה ועד השחרור, נמשך כ-600 מיליון שנים — כ-400 מיליון לבליטה ולאגס, כ-100 מיליון לפחיסות, ועוד כ-100 מיליון עד השחרור לפני 3.873 מיליארד שנים; זהו חלון התרחיש בן 600 מיליון

השנים של טבלת הסביבה, ומקרה 100 מיליון השנים נשאר מבחן רגישות. אין לזהות את הפליטות של שלב הבנייה עם געשיות מאוחרת בגוף שכבר נותק; הן שייכות לגוף המחובר, והן תהליך שונה מן הגעשיות של ירח חופשי. ארבעת השלבים מוצגים בחלק B.

מה שיש בידינו עתה: חשבון מסה המציב כל קילוגרם במקומו, הסיבה לכך שהגוף חייב להינשא ולא להיזרק, מאזן הכוחות שההזנה חייבת לקיים, מקור מרוכז, מעבר הנשמר פתוח בזכות החום, מאגמה מוקצפת קלה מספיק כדי להתרומם, ועור קפוא הנוצר במהירות מעל פנים נייד. השאלה אם הלחץ, הקצב והאנרגיה מספיקים היא נושא ההמשך הבא של חלק זה.

חלק A (המשך) — האם הלחץ, הקצב והאנרגיה מספיקים?

הבעיה

התיאור הגאומטרי דורש מספרים. אנו מחשבים מבחן לחץ עקבי, מתרגמים עודף לחץ אפשרי לקצב זרימה, ומגדירים את מאזן האנרגיה הנדרש. אותו תרחיש חייב לעמוד בשלושת המבחנים.

הסעיפים הקודמים תיארו את ההזנה במילים: מקור עמוק, מעבר שנשמר פתוח בזכות החום, וגוף שגדל בקצהו. המשך זה של חלק A שואל אם התיאור הזה עומד במבחן כשמצמידים לו מחיר. שלוש שאלות נשאלות בזו אחר זו, ולכל אחת התשובה היא מספר. הראשונה, **לחץ**: האם גוף האם מחזיק במקורו לחץ מספיק כדי לדחוף מגמה (חומר מותר) עמוקה עד רדיוס הקורוציה (A.9–A.10§)? השנייה, **קצב**: אם כן, האם הדחיפה הזאת יכולה להעביר את מסת הירח דרך מעבר בזמן העומד לרשותה (A.11§)? השלישית, **אנרגיה**: מאין באה העבודה הנדרשת להרמת המסה (A.12§)? הסעיף האחרון (A.13§) מצרף את הלחץ, הזרימה והעומס למצב אחד, קרוב לשחרור, ומראה כיצד חייב החיבור להיראות כדי ששלושתם יתקיימו בבת אחת. התוצאה האחרונה הזאת היא הגשר אל חלקים B ו-C.

A.9 מבחן לחץ מוגדר

את השאלה שסעיף זה עונה עליה קל לנסח: האם הלחץ הפנימי של גוף האם עצמו חזק מספיק כדי להחזיק עמוד של מגמה שנמשך ממרכזו ועד רדיוס הקורוציה — המרחק שבו גוף שמסתובב עם כדור הארץ כבר נע במהירות של מסלול חופשי? כדי לענות, מחושבים שני לחצים מתוך אותו שדה ומושווים זה לזה: הלחץ הזמין במקור, והלחץ שהעמוד דורש.

מהו עומד ההידרוסטטי. עמוד של חומר שעומד בשדה כבידה לוחץ על בסיסו במשקלו. הלחץ הנדרש בבסיס כדי להחזיק את העמוד במקומו — כך שלא ישקע ולא יעלה — נקרא העומד ההידרוסטטי של העמוד. משאבה ששולחת מים למכל על הגג חייבת לספק לפחות את העומד של עמוד המים שבין המשאבה למכל; בפחות מזה, המים לא מגיעים. הזנת הירח היא אותה בעיה בקנה מידה פלנטרי: המקור חייב לספק לפחות את העומד של עמוד מגמה שנמשך מעומק גוף האם ועד הגוף. בשדה אחיד העומד הוא פשוט צפיפות כפול תאוצת הכובד כפול גובה; כאן תאוצת הכובד משתנה לאורך העמוד, והסיבוב פועל נגדה, ולכן העומד מחושב כצפיפות כפול השינוי בפוטנציאל האפקטיבי לאורך המסלול (משוואה 5 של A.3§, לאחר אינטגרציה).

אנו בוחרים חתך ייחוס של גוף האם לפני חלוקת המסה: T_0, R_V, M_0 מן הטבלה. כלומר, גוף האם כולו כשחומר הירח עדיין בתוכו ($M_0 = 6.0455 \times 10^{24}$ ק"ג), הרדיוס הנפחי שאומץ עבורו (6,517 ק"מ) והיממה ההתחלתית שלו, 5.5 שעות. לצורך מבחן אנליטי בלבד, אנו משתמשים בשדה של כדור הומוגני ובחתך משווני מסתובב. זהו קירוב כדורי עם תיקון צנטריפוגלי, ולא פתרון שיווי משקל מדויק של ספרואיד Maclaurin. הבחירה שומרת על חשבון שקוף: כל איבר ניתן לכתיבה בצורה סגורה ולבדיקה ביד, והצורה הפחוסה האמיתית משנה את המספרים במידה מתונה בלבד.

נסמן $R = R_V$, $\rho_p = 3M_0 / (4\pi R^3)$; ρ_p היא הצפיפות הממוצעת של גוף האם, מסתו חלקי נפחו. השדה הפנימי הוא $g(r) = GM_0 r / R^3$, והשדה החיצוני GM_0 / r^2 . בתוך כדור אחיד, הכבידה גדלה ביחס ישר למרחק מהמרכז — אפס במרכז, ערך מלא בפני השטח — משום שרק המסה שמתחת לעומק נתון מושכת; מחוץ לכדור היא דועכת כהופכי של ריבוע המרחק. נקודת הקצה של מבחן העמוד היא:

$$r_* = \left(\frac{GM_0}{\omega_0^2} \right)^{1/3} = 15\,882.9 \text{ km.}$$

משוואה (8) היא רדיוס הקורטוציה של מאמר 2 (A.5§), כשמסת גוף האם כולו מוצבת בה: המרחק שבו (8) הכבידה מאוזנת בדיוק בידי האפקט הצנטריפוגלי של הסיבוב. זהו הקצה הטבעי של העמוד. מתחת ל- r_* המשיכה נטו מופנית פנימה, וכל קילומטר של עמוד מוסיף משקל שהמקור חייב להחזיק; ב- r_* המשיכה נטו היא אפס, ולכן חומר שנמצא שם אינו שוקל דבר במערכת המסתובבת, ומעבר לו המשיכה נטו מופנית החוצה. לכן את העמוד צריך לשלם רק עד r_* .

זוהי נקודת ייחוס **בשדה המלא של גוף האם ההתחלתי**; היא אינה מרחק השחרור של שני גופים בסוף המעבר. ההבדל בינה לבין ערך הייחוס של 15,818 ק"מ נובע מהמסה שבמשוואה: 15,818 ק"מ מחושב עם מסת כדור הארץ הסופית M_E , ו-15,882.9 ק"מ עם מסת גוף האם המלאה M_0 , שגדולה ממנה במסת הירח; ומסה גדולה יותר מציבה את נקודת האזיון מעט רחוק יותר.

מאין בא לחץ המקור. המקור העמוק אינו מנוע נפרד. הוא פנים גוף האם עצמו, הנלחץ תחת משקל כל מה שמעליו. במרכז גוף האם לוחץ כל משקל החומר שמעליו; הסיבוב מקל מעט על המשקל הזה בקו המשווה, משום שהאפקט הצנטריפוגלי פועל שם נגד הכבידה. כשנפתח נתיב מהפנים העמוק לכיוון פני השטח, הלחץ הזה — משקל פחות סיבוב — הוא שדוחף את המגמה לאורכו. לחץ המקור במרכז, ביחס ללחץ בפני השטח המשווניים, הוא:

$$p_s = \frac{\rho_p}{2} \left(\frac{GM_0}{R} - \omega_0^2 R^2 \right) = 150.26 \text{ GPa.}$$

במילים: האיבר הראשון בסוגריים, GM_0/R , הוא החלק הכבידתי; המקדם $\frac{1}{2}$ מופיע משום שהכבידה בתוך (9) כדור אחיד עולה בהדרגה מאפס במרכז ועד ערכה המלא בפני השטח, כך שלאורך הרדיוס היא פועלת בממוצע במחצית עוצמתה. האיבר השני, $\omega_0^2 R^2$, הוא ההקלה שהסיבוב נותן לאורך הרדיוס המשווני. כשמכפילים את הסוגריים בצפיפות הממוצעת של גוף האם, מתקבל לחץ: 150.26 ג'אה-פסקל. זה הלחץ שגוף האם, בכוח מסתו וסיבובו, מחזיק במקורו.

בעמוד בעל צפיפות עמוקה קבועה ρ_d וצפיפות חיצונית ρ_o , העמוד הנדרש הוא:

$$p_{\text{head}} = \rho_d I_d + \rho_o I_o,$$

העמוד מחולק לשני מקטעים, משום שהחומר בהם שונה. המקטע העמוק נמשך מהמרכז עד פני השטח של (10) גוף האם, והוא מלא במגמה עמוקה בצפיפות ρ_d . המקטע החיצוני נמשך מפני השטח ועד r_* , מעל גוף האם, והוא מלא בחומר החיצוני הקל יותר, בצפיפות ρ_o . כל מקטע תורם צפיפות כפול אינטגרל I , ו- I הוא השינוי בפוטנציאל האפקטיבי (כבידתי פחות צנטריפוגלי) לאורך המקטע — האנרגיה הנדרשת כדי להרים קילוגרם אחד לאורכו, בג'אול לקילוגרם, שזה אותו דבר כמו $\text{m}^2 \text{s}^{-2}$. צפיפות (קילוגרם למטר מעוקב) כפול אנרגיה לקילוגרם נותנת אנרגיה למטר מעוקב, וזהו לחץ.

$$I_d = \frac{1}{2} \left(\frac{GM_0}{R} - \omega_0^2 R^2 \right) = 2.88173 \times 10^7 \text{ m}^2 \text{s}^{-2},$$

משוואה (11) היא מדרגת הפוטנציאל בתוך גוף האם, מהמרכז ועד פני השטח המשווניים. אלה אותם (11) סוגריים כמו במשוואה (9); ההבדל היחיד הוא הצפיפות שמכפילה אותם. הזהות הזאת היא לב המבחן: לחץ המקור הוא העמוד של עמוד בצפיפות הממוצעת של גוף האם עצמו, והעמוד הנדרש הוא אותו עמוד כשהוא מלא במגמה. עמוד מגמה צפוף כמו גוף האם היה מאוזן בדיוק, ולא היה עולה מעבר לפני השטח. רק מגמה קלה מגוף האם מרוויחה עודף, והעודף הזה צריך אז לשלם את המקטע החיצוני.

$$I_o = GM_0 \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{r_*} \right) - \frac{\omega_0^2}{2} (r_*^2 - R^2) = 2.59450 \times 10^7 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}.$$

משוואה (12) היא מדרגת הפוטנציאל מחוץ לגוף האם, מפני השטח ועד r_* : האיבר הראשון הוא העבודה נגד (12) הכבידה החיצונית, והשני — העזרה שהסיבוב נותן לאורך אותו מרחק. אף שמקטע זה ארוך יותר מפי שניים מהמקטע העמוק, ערכו קטן מעט, משום שהכבידה נחלשת עם המרחק ועזרת הסיבוב גדלה. שני האינטגרלים יחד קובעים את העומד לכל זוג צפיפויות; הסעיף הבא מחשב אותו.

העמוד משמש מבחן לחץ בשדה נתון; מסתו והשפעתו על צורת הגוף אינן נפתרות כאן. לכן אין להרחיב את המבחן באופן אוטומטי להעברת מסת הירח כולה. הוא עונה על שאלה אחת — האם המקור יכול להחזיק קו של מגמה המגיע עד רדיוס הקורוטציה — ומשאיר את משקלו של חיבור ממשי, בעל ממדים סופיים, ל-A.13§.

A.10 סף צפיפות ורגישות

העומד תלוי במה שממלא את העמוד, ולחץ המקור אינו תלוי בכך. השאלה היא אפוא אילו צפיפויות עמוקות המקור יכול לשאת, והיכן עובר הגבול.

בהנחה ש- $\rho_o = 1\,500 \text{ kg m}^{-3}$, מתקבל:

ρ_d , ק"ג/מ"ק	העומד הנדרש, ג'יגה-פסקל	יתרה לפני עומס הקצה וההפסדים, ג'יגה-פסקל
1,500	82.14	68.12
3,000	125.37	24.89
3,500	139.78	10.49
4,000	154.19	-3.92
4,500	168.60	-18.33

טבלה: העומד הנדרש והיתרה מלחץ המקור (150.26 ג'יגה-פסקל) כפונקציה של הצפיפות העמוקה, עבור $\rho_o = 1\,500 \text{ ק"ג/מ"ק}$.

כיצד לקרוא את הטבלה. כל שורה ממלאת את המקטע העמוק במגמה בצפיפות אחרת; המקטע החיצוני נשאר ב-1,500 ק"ג/מ"ק. העמודה האמצעית היא העומד שהעמוד הזה דורש, לפי משוואה (10). העמודה הימנית, היתרה, היא לחץ המקור של 150.26 ג'יגה-פסקל פחות העומד הזה: מה שנשאר מהדחיפה אחרי שהעמוד הוחזק. יתרה חיובית פירושה שהדחיפה מספיקה — העמוד מוחזק, ונשאר לחץ כדי לשאת את הגוף בקצהו ולהניע את הזרימה. יתרה שלילית פירושה שהדחיפה אינה מספיקה: העמוד כבד מדי, והמגמה אינה מגיעה לרדיוס הקורוטציה. בקריאה כלפי מטה, העומד עולה באותה מדרגה לכל 500 ק"ג/מ"ק, והיתרה יורדת באותה מדרגה; הסימן מתהפך בין 3,500 ל-4,000 ק"ג/מ"ק. ב-3,500 ק"ג/מ"ק, ערך הייחוס שמשמש בהמשך חלק A, נותרים 10.49 ג'יגה-פסקל.

תנאי הזרימה הוא:

$$p_s - p_{\text{head}} - p_{\text{load}} - \Delta p_{\text{loss}} > 0,$$

משוואה (13) מנסחת את המאזן המלא. לחץ המקור צריך לשלם שלושה חשבונות: את העומד של העמוד, (13) p_{head} ; את העומס בקצה העמוד, p_{load} , שהוא הגוף עצמו הלוחץ בחזרה על המעבר; ואת ההפסדים לחיכוך בזמן שהמגמה זורמת, Δp_{loss} . המגמה נעה החוצה רק כל עוד נשאר משהו אחרי ששלושתם שולמו. הטבלה שלמעלה מציגה רק את החשבון הראשון, ולכן העמודה האחרונה שלה נקראת היתרה לפני עומס הקצה וההפסדים.

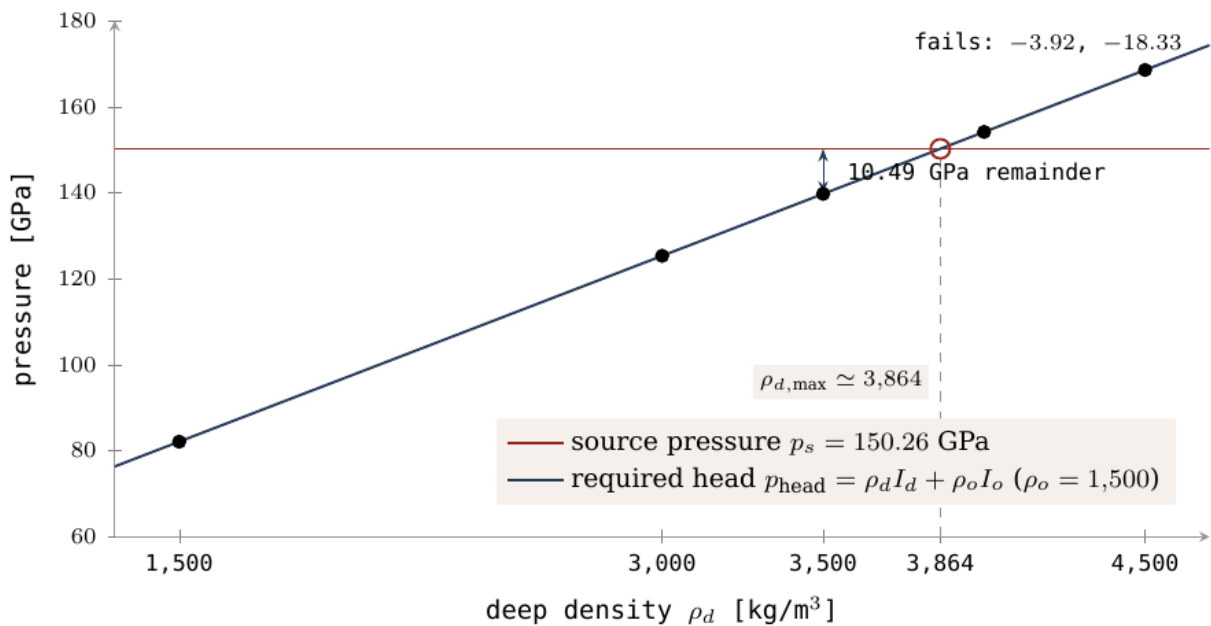
ולכן סף הצפיפות הוא:

$$\rho_{d, \max} = \frac{p_s - \rho_o I_o - p_{\text{load}} - \Delta p_{\text{loss}}}{I_d}.$$

משוואה (14) היא משוואה (13) כשהיא פתורה עבור הצפיפות העמוקה: המגמה העמוקה הכבדה ביותר (14) שהמקור עוד יכול לדחוף, אחרי ששולמו המקטע החיצוני, עומס הקצה וההפסדים. הסיבה לקיומו של סף נובעת מ-A.9§. לחץ המקור נקבע לפי הצפיפות הממוצעת של גוף האם, אבל העומד של המקטע העמוק גדל עם צפיפות המגמה שבו; בנקודה כלשהי השניים נפגשים. המצב דומה לשני צינורות מחוברים, אחד מלא מים ואחד מלא שמן: עמוד השמן עומד גבוה יותר מעמוד המים, משום שהוא קל יותר. גם המגמה העמוקה עולה מעל פני השטח של גוף האם רק משום שהיא קלה מגוף האם שסביבה, וככל שהיא קלה יותר, כך היא יכולה לעמוד גבוה יותר.

בהזנחת העומס וההפסדים, $\rho_{d, \max} \simeq 3864 \text{ kg m}^{-3}$. כל ג'יגה-פסקל נוסף של עומס או הפסד מוריד את הסף בכ-34.7 ק"ג/מ"ק: ג'יגה-פסקל אחד חלקי I_d , משום שכל ג'יגה-פסקל שמוצא במקום אחר הוא ג'יגה-פסקל שהמקטע העמוק כבר אינו יכול להשתמש בו. הסף רגיש גם לצפיפות המקטע החיצוני: $d\rho_{d, \max}/d\rho_o = -I_o/I_d \simeq -0.900$. במילים, כל קילוגרם למטר מעוקב שנוסף למקטע החיצוני מוריד 0.900 ק"ג/מ"ק מהסף העמוק, משום ששני האינטגרלים כמעט שווים ושני המקטעים חולקים מקור אחד.

מבחן הלחץ עובר עבור מגמה עמוקה קלה מ-3,864 ק"ג/מ"ק ונכשל מעל ערך זה. זוהי הדרישה הראשונה שהמנגנון מציב לחומר העמוק, והיא החדה ביותר: מגמה עשירה בנדיפים עומדת בה, מגמה יבשה אינה עומדת בה. הסיבה היא שנדיפים מומסים — מים ורכיבים קלים אחרים — מורידים את צפיפותה של מגמה סיליקטית (A.6§), והמרווח בין מעבר לכישלון נמצא בתוך הטווח שהם יכולים לספק. צפיפות של קצף סמוך לפני השטח אינה ראייה לצפיפות דומה בעומק: בועות נוצרות רק במקום שבו הלחץ נמוך מספיק כדי שהנדיפים ייצאו מהתמיסה, ולכן ליד פני השטח מגמה יכולה להיות קלה בהרבה מאותה מגמה בעומק. במודל בעל צפיפות משתנה יש להחליף את שני האיברים באינטגרל על $\rho[p(s), T(s), X(s)]$ — הצפיפות כפונקציה של הלחץ, הטמפרטורה וההרכב לאורך המסלול s — ויש לחשב מחדש גם את לחץ המקור ואת שדה הכבידה. המבחן בצפיפות קבועה הוא הצעד הראשון בחישוב הזה, והסף שלו הוא המספר שמולו יש לבדוק את משוואת המצב של המגמה העמוקה (D.1§).



איור 2. מבחן הלחץ של A.9–A.10§. העומד הנדרש עולה באופן ליניארי עם הצפיפות העמוקה; הוא חוצה את לחץ המקור ב- $\rho_{d, \max} \approx 3864$ ק"ג/מ"ק (בהזנחת העומס וההפסדים). הנקודות: הטבלה של A.10§ (בשרטוט: ציר אופקי — הצפיפות העמוקה ρ_d בק"ג/מ"ק; ציר אנכי — לחץ בג'יגה-פסקל; הקו האדום — לחץ המקור $p_s = 150.26$ ג'יגה-פסקל; הקו הכחול-כהה — העומד הנדרש $p_{\text{head}} = \rho_d I_d + \rho_o I_o$ עם $\rho_o = 1500$; החץ — "יתרה של 10.49 ג'יגה-פסקל"; בפינה הימנית העליונה — "נכשל: -3.92, -18.33".

איור 2 משרטט את הטבלה כשני קווים. הקו האדום השטוח הוא מה שהמקור מספק; הוא אינו תלוי במגמה. הקו הכחול-כהה העולה הוא מה שהעמוד עולה; הוא מטפס עם הצפיפות העמוקה. משמאל לנקודת החיתוך שלהם המקור מנצח, והפער האנכי בין הקווים הוא היתרה — 10.49 ג'יגה-פסקל ב-3,500 ק"ג/מ"ק, המסומנת בחץ. מימין לנקודת החיתוך העמוד מנצח וההזנה נעצרת. נקודת החיתוך, 3,864 ק"ג/מ"ק, היא הסף.

מה שיש בידינו עכשיו: גוף האם מחזיק 150.26 ג'יגה-פסקל במקורו, וזה מספיק כדי להחזיק עמוד מגמה עד רדיוס הקורוטציה, בתנאי שהמגמה העמוקה קלה מכ-3,864 ק"ג/מ"ק. אבל להחזיק את העמוד עדיין אינו להעביר מסה לאורכו; הסעיף הבא שואל באיזו מהירות המסה צריכה לנוע.

A.11 באיזה קצב צריכה ההזנה לפעול?

עודף לחץ פירושו שהמגמה יכולה לזרום; הוא אינו אומר כמה. השאלה כאן היא כמה מסה ההזנה צריכה לספק בכל שנייה כדי לבנות את הירח בזמן העומד לרשותה, ומה זה דורש מהמעבר.

אם חלק f_{int} ממסת היעד מגיע בדרך הפנימית לאורך זמן $\mathcal{T}$, הקצב הממוצע הוא:

$$\dot{M}_{\text{int}} = \frac{f_{\text{int}} m}{\mathcal{T}}.$$

משוואה (15) היא החשבון הפשוט ביותר האפשרי: המסה שההזנה מספקת, $f_{\text{int}} m$ (החלק הפנימי של מסת (15) הירח m ; השאר מגיע מהקליפה העולה, חלק B), חלקי הזמן $\mathcal{T}$ שבמהלכו היא מגיעה.

עבור $f_{\text{int}} = 1$ מתקבל כ- $2.33 \times 10^7 \text{ kg s}^{-1}$ לאורך 100 מיליון שנה, וכ- $3.88 \times 10^6 \text{ kg s}^{-1}$ לאורך 600 מיליון שנה. שני חלונות הזמן הם אלה של טבלת הסביבה: 600 מיליון שנה הם חלון התרחיש, ו-100 מיליון שנה הם מקרה הרגישות. עבור חלק פנימי קטן יותר, הקצב הממוצע יורד ביחס ישר. הקצבים האלה מתארים את הצטברות המסה הממוצעת נטו בגוף; כל אובדן של חומר שסופק מחייב קצב הזנה ברוטו גדול יותר. הזנה לסירוגין מחייבת

קצב גדול יותר בזמן הפעילות: אם ההזנה פועלת רק בחלק מהזמן, היא צריכה לפעול מהר יותר בזמן שהיא פועלת כדי לספק את אותה כמות כוללת.

לצורך מבחן רגישות, ניתן לייצג מקטע תחום גאומטרית כזרימה ניוטונית למינרית במעבר גלילי בעל רדיוס b , אורך ℓ ותנאי אי-החלקה:

$$Q = \frac{\pi b^4 \Delta p}{8 \eta \ell}, \quad \eta_{\max} = \frac{\pi b^4 \Delta p \rho_d \mathcal{T}}{8 \ell f_{\text{int}} m}.$$

כל אחד מהמונחים צריך מילת הסבר. זרימה **למינרית** נעה בשכבות חלקות, ללא מערבולות; **ניוטונית** (16) פירושה שההתנגדות של הנוזל מתוארת במספר אחד, הצמיגות שלו η — ההתנגדות של החומר לזרימה, נמוכה במים, גבוהה מאוד בזכוכית קרה או במעטפת המוצקה הזוחלת לאורך זמן גאולוגי; **אי-החלקה** פירושה שהנוזל שליד דופן המעבר אינו זז, ולכן הזרימה מהירה ביותר לאורך הציר ואיטית ביותר ליד הדופן. החלק הראשון של משוואה (16) נותן את נפח המגמה Q שעובר בכל שנייה דרך מעבר ברדיוס b ובאורך ℓ , כשהפרש לחצים Δp מניע אותו. החלק השני הופך את השאלה: זהו החלק הראשון כשהוא פתור עבור הצמיגות, כאשר Q נקבע לקצב הנפח שהבנייה דורשת (קצב המסה של משוואה 15 חלקי צפיפות המגמה). התוצאה, $\eta_{\max}$, היא הצמיגות הגבוהה ביותר שהחומר במעבר יכול להיות בה ועדיין לספק את מסת הירח בזמן. כל חומר שצמיגותו נמוכה מ- $\eta_{\max}$ עובר; כל חומר קשיח יותר נכשל.

זהו פתרון [1] Poiseuille, המשמש כאן כאומדן למקטע תחום; אי אפשר להניח שתנאי השפה שלו בדופן חל לאורך כל החלק החיצוני הבלתי-תחום.

עבור $\ell = 10^7 \text{ m}$, $\rho_d = 3500$, $\Delta p = 10 \text{ GPa}$, $f_{\text{int}} = 1$:

רדיוס המעבר	$\eta_{\max}$ ל-100 מיליון שנה, Pa s	$\eta_{\max}$ ל-600 מיליון שנה, Pa s
100 ק"מ	5.90×10^{18}	3.54×10^{19}
500 ק"מ	3.69×10^{21}	2.21×10^{22}
1,000 ק"מ	5.90×10^{22}	3.54×10^{23}

טבלה: הצמיגות המרבית $\eta_{\max}$ שעדיין מאפשרת לבנות את הירח, לפי רדיוס המעבר וחלון הזמן.

הקלטים הם מעבר באורך 10,000 ק"מ (10^7 m), בסדר גודל המרחק מהמקור העמוק עד הגוף), צפיפות הייחוס של המגמה, 3,500 ק"ג/מ"ק, ועודף מניע של 10 ג'יגה-פסקל — קרוב ליתרה של 10.49 ג'יגה-פסקל מ-A.108 — כשהירח כולו מסופק בידי ההזנה.

כיצד לקרוא את הטבלה. כל תא הוא החומר הקשיח ביותר שעדיין היה בונה את הירח דרך מעבר ברדיוס הנתון בזמן הנתון. בקריאה לאורך עמודה, התקרה עולה בתלילות עם הרדיוס: מעבר רחב סובל חומר קשיח בהרבה ממעבר צר. בקריאה לאורך שורה, התקרה גבוהה פי שישה ל-600 מיליון שנה מאשר ל-100 מיליון, משום שזמן ארוך יותר מחייב זרימה איטית יותר. לשם השוואה, טבלת הסביבה קובעת את הקליפה הקשיחה והקרה ב- $10^{23} \gtrsim$ פסקל-שנייה; רק המעבר הרחב ביותר בחלון הארוך ביותר מתקרב לערך הזה.

הרגישות החזקה היא b^4 : הקטנת הרדיוס פי שניים מקטינה את הקצב פי שישה-עשר באותו עודף לחץ ובאותה צמיגות. הסיבה היא שמעבר רחב יותר מרוויח פעמיים: יש לו חתך גדול יותר, ומרכזו רחוק יותר מהדפנות שמעכבות את הזרימה. בין 100 ל-500 ק"מ הרדיוס גדל פי חמישה והתקרה גדלה פי 5^4 , וזו המדרגה שבין שתי השורות הראשונות. ערכי הצמיגות בטבלה הם תקרות מתמטיות של האומדן, ולא תכונות שנמדדו במגמה. עודף של 10 ג'יגה-פסקל הוא פרמטר בדיקה; אם נשיאת הגוף צורכת את הלחץ שנותר, הלחץ הזה אינו זמין להנעת הזרימה. חלון זמן ארוך עשוי להקל על דרישת הקצב, אבל מחייב שהמעבר יישאר נייד ויציב לאורך כל הזמן הזה.

מה שיש בידינו עכשיו: עם עודף בגודל שמבחן הלחץ משאיר, מעבר של כמה מאות קילומטרים ומעלה יכול לשאת את מסת הירח בחלון התרחיש, בתנאי שהוא נשאר חם ונייד. רוחב המעבר חשוב הרבה יותר מכל קלט אחר; A.13§ חוזר אליו.

A.12 אנרגיה: מהו מקור העבודה?

הלחץ והקצב עוסקים באופן שבו המסה נעה; האנרגיה עוסקת במה שמשלם על הזזתה. הרמת מסת הירח מפני השטח של כדור הארץ עד רדיוס הקורטוציה היא עבודה שנעשית נגד הכבידה, והמודל חייב לומר מאין העבודה הזאת באה.

בדיקת סדר גודל של העבודה הכבידתית עבור מסת היעד המלאה, בשדה ארצי קבוע, מ-8,991 ק"מ ועד השחרור ב-16,400 ק"מ, נותנת:

$$W_g = GM_E m \left(\frac{1}{r_0} - \frac{1}{r_1} \right) \approx 1.47 \times 10^{30} \text{ J.}$$

משוואה (17) היא העבודה הסטנדרטית הנדרשת כדי להזיז מסה m החוצה בכבידה של מסה M_E , ממרחק (17) r_0 למרחק r_1 ממרכזה. כאן $r_0 = 8991$ ק"מ הוא המרחק בין המרכזים כאשר גוף בעל מסת הירח המלאה נוגע בפני השטח של גוף האם (A.2§), ו- $r_1 = 16400$ ק"מ הוא מרחק השחרור בקו המשווה. "שדה ארצי קבוע" פירושו שמסת כדור הארץ מוחזקת קבועה והגוף מטופל כנקודה.

האומדן מתייחס להזזת מסה נתונה בין שני מרחקים; הוא אינו מאזן העבודה המלא של גוף הגדל מתוך המקור העמוק. המאזן המלא חייב לכלול את השינוי באנרגיה הכבידתית של המערכת כולה, את אנרגיית הסיבוב, את האנרגיה הפנימית, את ההפסדים ואת האנרגיה הנישאת בחומר העוזב.

אין למנות באופן אוטומטי את אנרגיית הקשירה הכוללת של כדור הארץ כאנרגיה זמינה. אנרגיית הקשירה היא האנרגיה שהייתה נדרשת כדי לפרק את כדור הארץ כולו נגד הכבידה של עצמו; היא גדולה, אבל היא אינה אגורה בצורה שאפשר להוציא אותה. אנרגיה נעשית זמינה רק כאשר הגוף עובר למצב קשור יותר. נדרשת התפתחות פיזיקלית שמשחררת אנרגיה: למשל, סידור מחדש של הצפיפות, התכווצות או ירידה באנרגיה הפנימית, יחד עם חילופי אנרגיית סיבוב. העבודה היא בסדר גודל של 10^{30} ג'אול, פחות מאחוז אחד מאנרגיית הקשירה של גוף האם; ההתפתחות שמשחררת אותה — ברזל שוקע ופנים מתכווץ ומתקרר — היא אותה התפתחות שמניעה את העלייה. כאשר ברזל שוקע לעבר המרכז, מסת גוף האם מתקבצת קרוב יותר ואנרגיה כבידתית משתחררת; הרמת הירח זקוקה רק לחלק קטן ממנה. המאזן האנרגטי המלא של ההתפתחות הזאת הוא דרישה המפורטת ב-D.1§.

A.13 מבחן משולב באותו מצב: לחץ, זרימה ועומס

סעיפים A.9 עד A.11 בחנו את הלחץ ואת הזרימה בנפרד, ועל גוף האם ההתחלתי. חיבור ממשי פוגש את כולם בבת אחת, ובמצב מאוחר יותר: כדור ארץ קטן יותר (מסת הירח כבר עזבה אותו), יממה איטית יותר, גוף רחוק מקו המשווה, ומשקל הגוף הלוחץ על קצה המעבר. השאלה כאן היא אם מעבר אחד יכול לעבור את כל המבחנים במצב אחד ויחיד — ואם אינו יכול לעבור אותם כצינור דק, איזו צורה חייבת להיות לו.

כדי לבחון את שלושת הגדלים יחד, אנו בוחרים את המצב האחרון של הטיפוס, בקו הרחוב של השחרור מחלק C: מסת כדור הארץ M_E , מסת הגוף m , יממה של 5.77 שעות, קו רחב 22.5° , ומרכז הגוף רדיוס-גוף אחד בתוך קו הקורטוציה, $r = 15397 \text{ km}$ — כשצדו הרחוק נוגע בקו (בשחרור, על הקו עצמו, העומס הרדיאלי נעלם ונשאר רק העומס הצידי, C.2§). קו הקורטוציה ב- 22.5° נמצא ב-17,287 ק"מ (מאמר 4); לגוף ברדיוס 1,889.77 ק"מ שצדו הרחוק נוגע בו, המרכז נמצא ב-15,397 ק"מ. זהו המצב האחרון של הטיפוס לפני השחרור: הגוף נמצא במרחקו הגדול ביותר לפני שמרכזו מגיע לקו, ומשקלו על המעבר עדיין לא ירד לאפס. לצורך חתך לחץ אנליטי

בלבד, נשמרים רדיוס נפחי ארצי של 6,517 ק"מ וקירוב של צפיפות הומוגנית. אלה קירובי חתך, ולא צורת שיווי המשקל המלאה של הגוף המחובר.

נגדיר ציר u ממרכז כדור הארץ לכיוון הגוף. הרדיוס השקול של הגוף בצפיפות 2,600 הוא 1,889.77 ק"מ, ולכן הקצה הקרוב של מעבר ההזנה נמצא ב- $u_t = r - R_b = 13\,507.23 \text{ km}$. העמוד נמשך אפוא ממרכז כדור הארץ ($u = 0$) עד הצד הקרוב של הגוף ($u = u_t$); שם הגוף יושב עליו. הפוטנציאל לאורך הציר כולל את משיכת הגוף ואת התאוצה של ראשית מערכת הייחוס הארצית:

$$\Phi(u) = \Phi_E(u) - \frac{Gm}{r-u} + \frac{Gm}{r^2}u - \frac{1}{2}\omega^2 u^2 \cos^2 \lambda.$$

משוואה (25) מונה כל השפעה שמושכת חלק מהעמוד במרחק u , כתובה כאנרגיה פוטנציאלית לקילוגרם. (25) האיבר הראשון, Φ_E , הוא הכבידה של כדור הארץ. השני הוא הכבידה של הגוף עצמו, שמושכת את העמוד לכיוון הגוף ובכך עוזרת להזנה סמוך לקצה העליון שלה. האיבר השלישי מתקן את העובדה שכדור הארץ עצמו אינו במנוחה: הגוף מושך את מרכז כדור הארץ אליו, ולכן מערכת ייחוס הקבועה במרכז כדור הארץ מאיצה, וכל מה שבתוכה חש משיכה מדומה אחידה בכיוון ההפוך. האיבר הרביעי הוא האפקט הצנטריפוגלי של הסיבוב; בקו רוחב λ , נקודה במרחק u נמצאת רק במרחק $u \cos \lambda$ מציר הסיבוב, ולכן מופיע $\cos^2 \lambda$.

עבור הכדור הארצי ההומוגני:

$$\Phi_E(u) = \begin{cases} -\frac{GM_E}{2R} \left(3 - \frac{u^2}{R^2} \right), & u \leq R, \\ -\frac{GM_E}{u}, & u \geq R. \end{cases}$$

משוואה (26) היא הפוטנציאל של כדור אחיד: בפנים הוא מעמיק לעבר המרכז כפרבולה, בהתאמה לכבידה (26) שגדלה ביחס ישר למרחק מהמרכז כמו ב-A.98; בחוץ הוא הצורה המוכרת של מסה נקודתית.

האיבר הליניארי במשוואה (25) מבטל את התאוצה האחידה של מרכז כדור הארץ הנגרמת בידי הגוף. מתקבל $I_d = \Phi(R) - \Phi(0) = 2.88219 \times 10^7 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ ו- $I_o = \Phi(u_t) - \Phi(R) = 2.42862 \times 10^7 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$. אלה אותן שתי מדרגות פוטנציאל כמו במשוואות (11) ו-(12), מחושבות עכשיו במצב המאוחר: המדרגה העמוקה כמעט לא השתנתה, והמדרגה החיצונית קטנה במידת מה, בעיקר משום שהעמוד מסתיים בצד הקרוב של הגוף ולא ברדיוס הקורטוציה, ומשיכת הגוף עצמו עוזרת. לחץ המקור לאורך החתך הוא $p_s = \rho_p I_d = 148.46 \text{ GPa}$, כאשר כן $\rho_p = 5\,150.96 \text{ kg m}^{-3}$, לפי מסת כדור הארץ לאחר חלוקת המסה. כמו ב-A.98, לחץ המקור הוא העומד של עמוד בצפיפות הממוצעת של גוף האם עצמו, כעת זו של כדור הארץ ללא הירח.

למבחן ההתנגדות אנו בוחרים מעבר גלילי ברדיוס b , צפיפות עמוקה 3,500, צפיפות חיצונית 1,500 ק"ג/מ"ק וצמיגות אחידה מאומצת $\eta = 10^{19} \text{ Pa s}$. קצב המסה הוא ממוצע הייחוס ל-600 מיליון שנה, $\dot{M} = 3.882 \times 10^6 \text{ kg s}^{-1}$; זהו מבחן של מצב, ולא הוכחה שהמצב נמשך 600 מיליון שנה. החלת אומדן הזרימה התחומה על שני המקטעים נותנת:

$$\Delta p_{\text{visc}} = \frac{8\eta\dot{M}}{\pi b^4} \left(\frac{R}{\rho_d} + \frac{u_t - R}{\rho_o} \right).$$

משוואה (27) היא יחס Poiseuille של משוואה (16) המוחל על שני המקטעים בזה אחר זה ומסוכם: הלחץ (27) שמוצא על חיכוך כדי לדחוף את קצב המסה $\dot{M}$ דרך מקטע עמוק באורך R המלא במגמה בצפיפות ρ_d , ודרך מקטע חיצוני באורך $u_t - R$ המלא בחומר בצפיפות ρ_o . חלוקת קצב המסה בצפיפות הופכת אותו לקצב נפח; החומר החיצוני הקל יותר חייב לזרום מהר יותר עבור אותו קצב מסה, ולכן הוא עולה יותר לכל קילומטר.

העומס הרדיאלי בקצה נכתב כמאמץ ממוצע $p_r = m_r a_r / (\pi b^2)$, והרכיב הצידי כ- $\tau_\lambda = m_r a_\lambda / (\pi b^2)$. כאן $m_r a_r$ הוא הכוח שבו הגוף לוחץ לאורך הציר על קצה המעבר — משקלו במערכת המסתובבת, המשיכה הכבידתית פנימה פחות הרכיב הצנטריפוגלי החוצה לאורך הציר — ו- $m_r a_\lambda$ הוא הכוח הצידי. הכוח הצידי קיים משום שהגוף אינו נמצא על קו המשוואה: האפקט הצנטריפוגלי מופנה הרחק מציר הסיבוב, ולא לאורך הקו היוצא ממרכז כדור הארץ, ובקו רוחב 22.5° חלק ממנו דוחף את הגוף הצידה, לעבר מישור המשוואה. חלוקת כל כוח בחתך המעבר, πb^2 , הופכת אותו למאמץ שקצה המעבר חייב לשאת. ביטויים אלה סוגרים את המודל הממוצע על פני חתך הניצב לציר; הם אינם פותרים את התפלגות הלחץ על פני חיבור בעל ממדים סופיים. יתרת הלחץ הרדיאלי היא:

$$\Delta p_{\text{rem}} = p_s - \rho_d I_d - \rho_o I_o - p_r - \Delta p_{\text{visc}}.$$

משוואה (28) היא המאזן המלא של משוואה (13), כשכעת כל חשבון מתומחר באותו מצב: לחץ המקור, (28) פחות העומד של שני המקטעים, פחות משקל הגוף על הקצה, פחות החיכוך של הזרימה. כמו ב-A.10§, יתרה חיובית פירושה שהדחיפה מספיקה.

רדיוס המעבר, ק"מ	עומס רדיאלי, ג'יגה-פסקל	הפסד זרימה, ג'יגה-פסקל	יתרה רדיאלית, ג'יגה-פסקל	מאמץ צידי נדרש, ג'יגה-פסקל	מסת המקטע החיצוני במסות ירח
500	46.18	0.01032	-35.03	46.04	0.112
1,000	11.54	0.000645	-0.39	11.51	0.448
1,500	5.131	0.000127	6.024	5.116	1.008

טבלה: המבחן המשולב במצב האחרון של הטיפוס (קו רוחב 22.5° , יממה של 5.77 שעות) לשלושה רדיוסי מעבר.

כיצד לקרוא את הטבלה. כל שורה היא מעבר ברדיוס אחר באותו מצב. לפני ששולמו העומס והחיכוך, המקור והעומד משאירים כ-11 ג'יגה-פסקל: 148.46 ג'יגה-פסקל פחות העומד של שני המקטעים (בכל שורה — היתרה ועוד העומס הרדיאלי ועוד הפסד הזרימה). הטבלה מראה אז מה החשבונות הנותרים לוקחים ממנו. **העומס הרדיאלי** הוא משקל הגוף כשהוא פרוס על חתך המעבר; הוא יורד כמו $1/b^2$, מ-46.18 ג'יגה-פסקל ב-500 ק"מ ל-5.131 ג'יגה-פסקל ב-1,500 ק"מ, משום שאותו משקל נשען על שטח גדול יותר. **הפסד הזרימה** זעיר בכל השורות — לכל היותר כמאית ג'יגה-פסקל — ולכן החיכוך אינו המגבלה במצב הזה. **היתרה הרדיאלית** היא מה שנשאר; היא שלילית מאוד במעבר של 500 ק"מ, מעט מתחת לאפס ב-1,000 ק"מ, וחיובית ב-1,500 ק"מ. **המאמץ הצידי** הוא הדחיפה הצידית שקצה המעבר חייב לעמוד בפניה; הוא כמעט גדול כמו העומס הרדיאלי בכל השורות, משום שב- 22.5° וכה קרוב לקו, הרכיב הצידי והרכיב הרדיאלי של המשקל האפקטיבי של הגוף הם בגודל דומה. העמודה האחרונה היא מסת החומר העומד במקטע החיצוני של המעבר עצמו, ביחידות של מסת הירח; היא גדלה כמו b^2 , מכעשירית ירח ב-500 ק"מ ועד ירח שלם ב-1,500 ק"מ.

מסת המקטע החיצוני נאמדת באותה גאומטריה:

$$M_{\text{bridge, out}} = \pi b^2 \rho_o (u_t - R).$$

משוואה (29) היא נפח של גליל ברדיוס b ובאורך $u_t - R$ — החלק של המעבר שעומד מעל פני השטח של (29) כדור הארץ — כפול צפיפות החומר הממלא אותו.

תוצאה

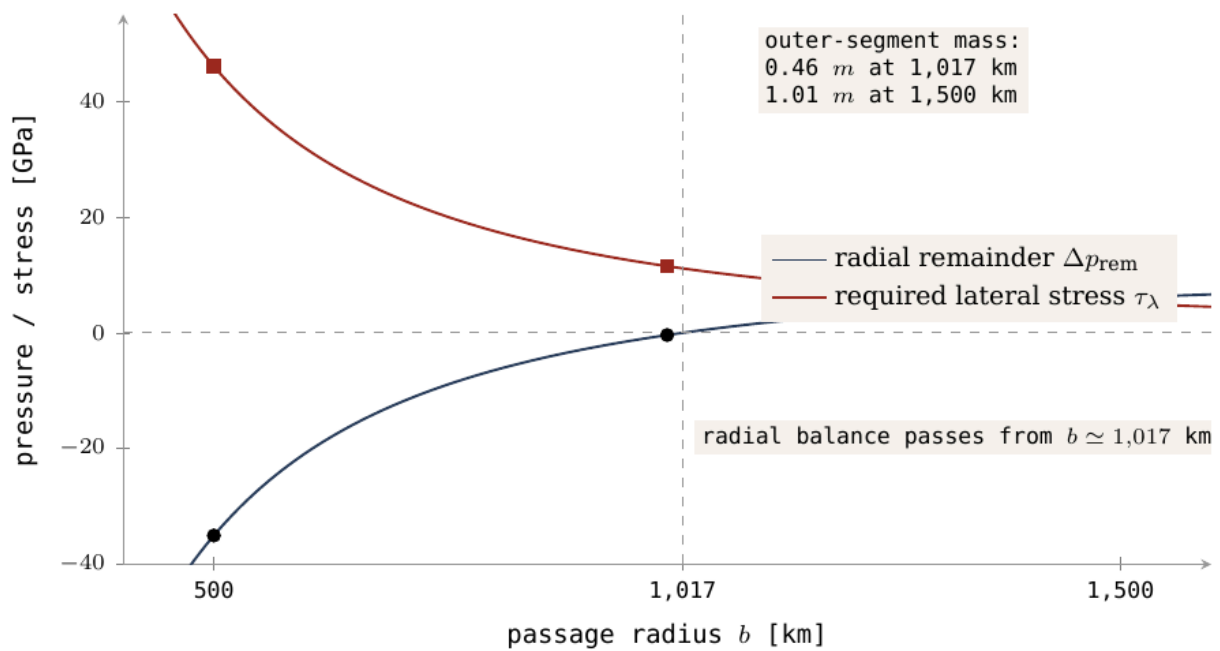
תוצאת המבחן: עם הקלטים האלה, מאזן הלחץ הרדיאלי עובר מרדיוס של כ-1,017 ק"מ. אבל כבר בסף הזה מסת המקטע החיצוני היא כ-0.46 ממסת הירח. ההנחה של חיבור בעל מסה זניחה אינה עקבית אפוא

בתחום שעובר את המבחן הרדיאלי. יש לחלק מחדש את המסה הזאת בין המאגרים שבמשוואה (1), ולכלול את שדה הכבידה שלה ואת התנע שלה; אין להוסיף אותה לשתי המסות הנתונות בלי לשנות את המצב. במילים פשוטות: צינור דק נכשל משום שמשקל הגוף, המרוכז בקצה קטן, מועך את היתרה אל מתחת לאפס; צינור רחב מספיק כדי לפזר את המשקל הזה הוא רחב כל כך שהוא עצמו מכיל כמעט חצי ירח של חומר. החיבור אינו יכול להיות גם צר וגם חסר מסה.

בנוסף, נזל במנוחה שמעביר לחץ רק דרך החתך הרדיאלי אינו מספק את המאמץ הצידי. נזל במנוחה יכול לדחוף אבל אינו יכול להחזיק כוח צידי — זה מה שהופך אותו לנוזל. עמוד מגמה יכול לשאת את משקל הגוף לאורך הציר, אבל אינו יכול בכוחות עצמו למנוע מהגוף להידחק לעבר קו המשווה. פתרון אפשרי היה צריך להגדיר צורת חיבור, מאמצים צמיגים או חוזק של חומר נושא עומס, ותנע המועבר בזרימה. החימום מקל על המעבר; את העומס הצידי נושאת צורת החיבור, שהיא הבסיס הרחב של הכיפה של חלק B.

הרגישות לצפיפות נשארת מכרעת: כשמעלים את הצפיפות החיצונית ל-2,000 ק"ג/מ"ק, היתרה ברדיוס 1,000 ק"מ נעשית כ-12.5 GPa, כששאר הקלטים ללא שינוי. עלייה מתונה בצפיפות המקטע החיצוני מזיזה אפוא את רדיוס הסף הרבה מעבר ל-1,000 ק"מ, מאותה סיבה כמו ב-A.10§: כל קילוגרם למטר מעוקב בעמוד עולה עומד. קיצור זמן ההזנה ל-100 מיליון שנה מכפיל את הפסד הזרימה פי שישה באומדן, אבל אינו מסיר את דרישת המאמץ הצידי ולא את מסת החיבור. גם לאחר הכפלה פי שישה, הפסד הזרימה נשאר הרבה מתחת לג'יגה-פסקל בכל שלוש השורות, ולכן המסקנה אינה תלויה בחלון הזמן.

זוהי מגבלה כמותית של הקירוב הגלילי: **מעבר במבחן הלחץ אינו עדיין מעבר במבחן הבנייה המלא.** התוצאה אומרת למודל כיצד החיבור שלו חייב להיראות: רחב מספיק כדי לעבור את המאזן הרדיאלי (מעל כ-1,000 ק"מ), ולכן מסיבי מספיק כדי שמסתו והמאמצים הצידיים שלו ייכנסו למאזן. החיבור הזה הוא בסיס הכיפה של חלק B — אזור מגע ברוחב 3,000 ק"מ, מחצית מרוחב הבסיס של 6,000 ק"מ ורבע משטחו — וחלק C מראה כיצד הגוף מתחיל להיפרד בקו הקורטציה ומשתחרר מעט מעבר לו. לאזור מגע ברוחב 3,000 ק"מ יש רדיוס של 1,500 ק"מ, השורה האחרונה בטבלה, שבה היתרה הרדיאלית חיובית; העומס הצידי שלו נישא לא בלחץ נזלי אלא בצורתו: בסיס רחב וחם העומד על אגס רחב ממנו.



איור 3. המבחן המשולב של A.13§ במצב האחרון של הטיפוס, בקו רוחב 22.5° וביממה של 5.77 שעות. היתרה הרדיאלית נעשית חיובית מ- $b \approx 1,017$ ק"מ, אבל המאמץ הצידי הנדרש נשאר בסדר גודל של ג'יגה-פסקלים, ומסת המקטע החיצוני גדלה כמו b^2 . הנקודות: הטבלה של A.13§. הפסד הזרימה (< 0.013 ג'יגה-פסקל) אינו נראה בקנה מידה זה. (בשרטוט: ציר אופקי — רדיוס המעבר b בק"מ; ציר אנכי — לחץ / מאמץ בג'יגה-פסקל; הקו הכחול-כהה — היתרה הרדיאלית Δp_{rem} ; הקו האדום — המאמץ הצידי הנדרש τ_λ ; ליד הקו המקווקו האנכי — "המאזן הרדיאלי עובר מ- $b \approx 1,017$ ק"מ"; בתיבה העליונה — "מסת המקטע החיצוני: 0.46 m ב-1,017 ק"מ, 1.01 m ב-1,500 ק"מ".)

איור 3 מציג את שני הגדלים שמכריעים את המבחן ככל שהמעבר מתרחב. העקומה הכחולה-כהה, היתרה הרדיאלית, עולה מעומק רב מתחת לאפס וחוצה אותו בכ-1,017 ק"מ; מימין לקו המקווקו המאזן הרדיאלי עובר. העקומה האדומה, המאמץ הצידי, יורדת עם הרוחב אבל נשארת בכמה ג'יגה-פסקלים לכל אורכה — עומס צידי שלחץ לבדו אינו יכול לשאת. התיבה שבראש האיור רושמת את מחיר המעבר: המקטע החיצוני שוקל כבר בסף 0.46 ירח, וירח שלם ב-1,500 ק"מ.

מה שיש בידינו עכשיו: הלחץ של גוף האם מספיק כדי להחזיק עמוד של מגמה קלה עד רדיוס הקורוציה; מעבר של כמה מאות קילומטרים ומעלה יכול לשאת את מסת הירח בחלון התרחיש; ההרמה עולה בסדר גודל של 10^{30} ג'אול, חלק קטן ממה שהברזל השוקע משחרר. אבל החיבור שעומד בשלושתם במצב אחד אינו צינור דק. הוא רחב, חם ומסיבי, והוא נושא את העומס הצידי שלו בזכות צורתו. חלק B מתאר את הצורה הזאת מבחוץ.

חלק B — מבחוח: הגוף על קצה האגס

הבעיה

ההזנה הפנימית מרימה חומר; היא אינה מסבירה בעצמה מאין בא הקרום של הירח, מדוע הוא עבה יותר בצד הרחוק, ומדוע הירח נושא תיעוד קדום של מכתשים הפרוש על פני שני חצאי הכדור. **הגיישה:** הקליפה החיצונית נבחנת כפני השטח של אותו גוף שחלק A מזין. אנו עוקבים אחריה לאורך ארבעה שלבים, קובעים את הגיאומטריה שלה בכל שלב, וגוזרים למה היא הופכת.

חלק A עקב אחר החומר העולה בתוך הגוף: המקור העמוק, הלחץ המניע אותו, וקצב ההזנה והאנרגיה שלה. חלק זה מתבונן באותו גוף מבחוח. את שאלתו קל לנסח: מה קורה לעור החיצוני של כדור הארץ מעל אזור הבנייה בזמן שהגוף נבנה מתחתיו ומעליו, והיכן מגיעה כל פיסה של העור הזה על הירח שאנו רואים היום? התשובה היא הליבה הגיאומטרית של המודל. היא נבנית כאן בארבעה צעדים, צעד אחד לכל שלב, והתמונה בכל צעד נקבעת במספרים לפני שעוברים לצעד הבא.

החלק כולו נשען על תמונה אחת, וכדאי להחזיק בה מההתחלה. הקליפה החיצונית של כדור הארץ אינה נשארת מאחור בזמן שהגוף עולה; היא עולה יחד עם הגוף, כעור של הכיפה העליונה שלו. הגוף עצמו אינו כדור הצף בחופשיות, אלא כדור פחוס המונח על קצה האגס: שתי כיפות, אחת על השנייה — כיפה תחתונה העוטפת מלמעלה את הקצה המעוגל, וכיפה עליונה המתנשאת גבוה מעליו. כאשר הגוף מתעגל מאוחר יותר החוצה לכדור, כל חלק של פני השטח שלו שומר על חלקו בשלם, ולכן אפשר לעקוב אחר כל חלק עד הירח של היום.

ארבעת השלבים, והתאמתם לסדרה. מאמר זה ממספר את השלבים שלו עצמו: שלב 1, השלב השטוח (B.1§); שלב 2, הגוף על קצה האגס (B.2§); שלב 3, ההתעגלות החוצה (B.4§); שלב 4, הפחיסות, ההתעגלות פנימה והשחרור (B.6, C.4–C.8§§). הסדרה כולה ממספרת את תולדות הירח בשלבים 0–8: 0 לפני הבליטה, 1 הבליטה, 2 הכיפה, 3 האגס, 4 ההתעגלות (החוצה, אחר כך פחיסות, אחר כך פנימה), 5 השחרור, 6 גורל האגס, 7 ההתרחקות, 8 היום. שני המספורים מתאימים זה לזה כך. שלב 1 של מאמר זה הוא שלב 0 של הסדרה ותחילת הבליטה, כשהקליפה עדיין שוכבת שטוחה מעל ההזנה. שלב 2 הוא הבליטה, הכיפה והאגס (שלבים 1–3 של הסדרה), כפי שהם נראים ברגע שבו הגוף יושב ככיפה על קצה האגס. שלב 3 הוא החלק הראשון של שלב 4 בסדרה, ההתעגלות החוצה. שלב 4 הוא שאר שלב 4 בסדרה — הפחיסות וההתעגלות פנימה — יחד עם שלב 5 בסדרה, השחרור. שלב 6 בסדרה, גורל האגס, הוא חלק E של מאמר זה; שלב 7, ההתרחקות, הוא מאמר 4, המסלול; שלב 8, הירח של היום, הוא המקום שבו B.4–B.7§§ ממקמים כל אזור של פני השטח.

B.1 שלב 1 — השלב השטוח והקליפה הנאספת

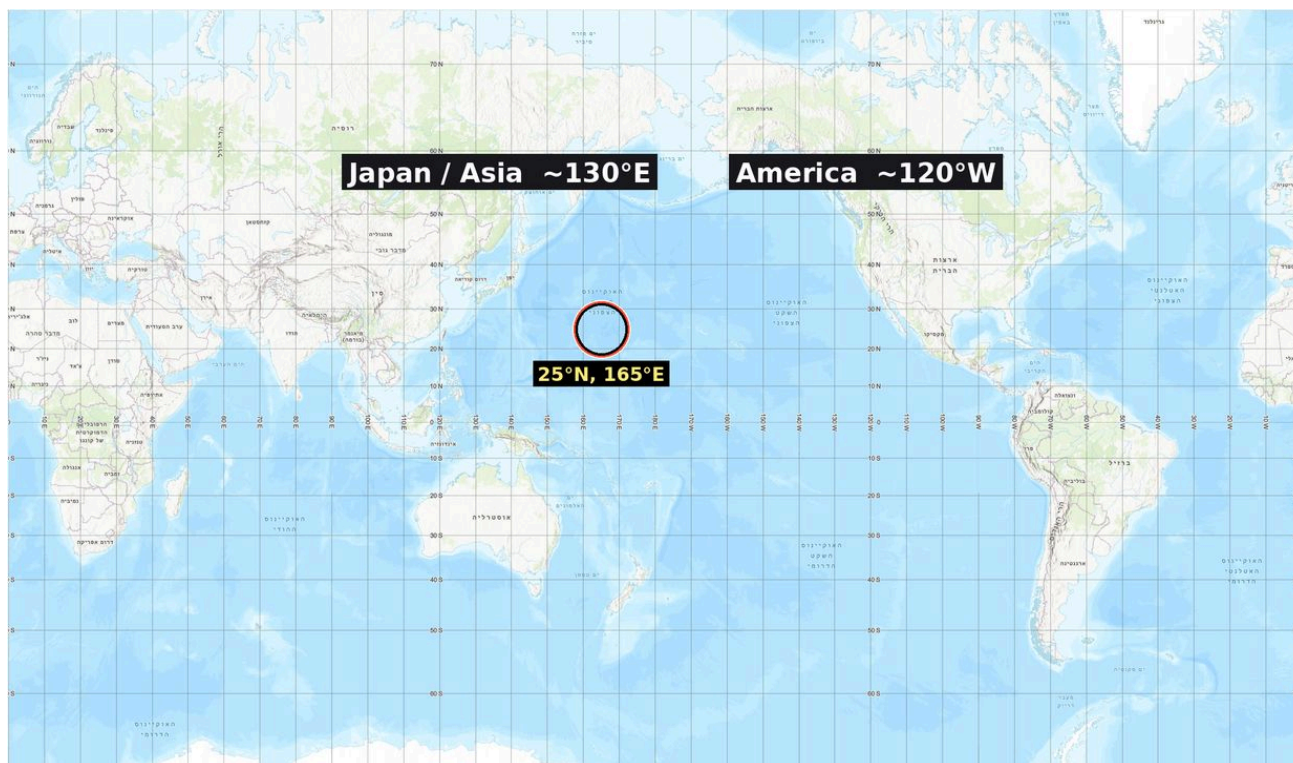
לפני שהגוף עולה, השכבה הסיאלית החיצונית של גוף האם מעל אזור הבנייה שוכבת שטוחה, מעל הזנה פעילה. "סיאלי" מתייחס לסיאל, השכבה העליונה והקלה של קרום כדור הארץ, העשירה בצורן ובאלומיניום; מתחתיה נמצאת הסימה, השכבה הצפופה יותר, העשירה בצורן ובמגנזיום. חומר עמוק מגיע אל הסיאל דרך פתחים ונפלט דרכם; חלק מהחומר הנפלט חוזר ונוחת על הקליפה החשופה ויוצר מכתשים (מאמר 6, המכתשים). הקליפה בשלב זה היא המקור של קרום הירח ושל תיעוד המכתשים המוקדם ביותר שלו. לכך יש משמעות, משום שפירוש הדבר הוא שפני השטח העתיקים ביותר של הירח לא נוצרו על הירח: הם נוצרו כאן, על כדור הארץ, לפני שהגוף היה קיים, ונישאו מעלה מאוחר יותר.

השטח ההתחלתי של הקליפה שתיצור את הכיפה שונה משטח הפנים של הכיפה המתקבלת. אגן האוקיינוס השקט בשחזור של המחבר (איור 4) — כ- 1.65×10^{14} מ"ר עם הימים השוליים שלו, וכ- 1.0×10^{14} מ"ר בלעדיהם — גדול פי 1.4 עד 2.4 משטח הכיפה העליונה בשלב 2 (7.0×10^{13} מ"ר, להלן). בתמונה זו הקליפה מעל האזור נמשכה פנימה, בשטח, בגורם של עד כשניים כשהכיפה נוצרה, כמו מפה הפרושה שטוחה על שולחן ונאספת פנימה כשמרימים את אמצעה. לכן האגן מסמן את אזור המקור של החומר הנאסף, ולא את טביעת הרגל של הכיפה עצמה. זוהי קריאה של תופעה עכשווית, והמאמר מציין את הקושי שבה כפי שעשה מאמר 2: קרקעית האגן של היום צעירה מ-180 מיליון שנה, והקריאה מתייחסת לאסימטריה בין חצאי הכדור בליתוספרה שמתחתיה — השכבה החיצונית הקשיחה של כדור הארץ, הקרום והחלק העליון ביותר של המעטפת, שהיא עתיקה יותר ומעוגנת עמוק יותר מקרקעית הים המכסה אותה היום.

בסיס האגס וגבו. האזור המסומן באיור 4 הוא האגס כפי שהוא נראה מלמעלה בזמן שנטה, ולא כפי הרגל שלו. בסיס האגס היה מזרחה משם, לעבר אמריקה, ולכל רוחבו היו בו פתחים — אל תוך האגס, ודרכו הלאה אל הירח: בשחזור של המחבר מרכזו נמצא ליד Kiritimatī, באי Line של Kiribati — ליד הכפרים London, Paris ו-Poland — בקירוב ב- 1.9° צפון, 157.5° מערב — כ-4,800 ק"מ מזרח-דרום-מזרח מהקריאה הקודמת.

האגס לא עמד זקוף, והסיבה היא סיבוב כדור הארץ. כשנמתח החוצה, החלק החיצוני שלו, שנישא הרחק מהציר, פיגר אחרי סיבוב כדור הארץ — כמו זרועותיה של מחליקה המפגרות כשהיא פורשת אותן — והאגס כולו נטה לאחור, מערבה, כשקצהו והירח שעליו נגררים מאחור (C.8§). הוא נטה גם צפונה: מבסיס סמוך לקו המשווה הגיע קצהו לכ- 22.5° צפון, קו רוחב השחרור של מאמר 4. הסיבוב אינו מקנה את הנטייה הצפונית הזאת — בכל קו רוחב הדחיפה הצידי של מכוונת אל קו המשווה — היא באה מההזנה: המקור העמוק, אזור ההזנה המרכזי של A.4§, נמצא מצפון לקו המשווה, וההזנה עלתה ממנו באלכסון, צפונית לבסיס, ונשאה איתה את האגס צפונה (D.1§).

הצד המערבי של האגס, שמתחתיו נמצאת היום יפן, הוא גבו, שנאסף בחזרה אל כדור הארץ אחרי השחרור; חזית האגס, שנמתחה במתיחה כשנטה, נאספה בחזרה אל הפסים של מאמר 9, הפסים. מאמר 9 מאתר גם את חותמו של הקצה עצמו: בין שני כיפופים של הפסים, אזור ברוחב 3,360 ק"מ שמרכזו ב- 9.3° צפון, 169.3° מזרח, כ-3,760 ק"מ מערבה מהבסיס לפי הקואורדינטות (גרסה קודמת נתנה 3,770 ק"מ) — הכיוון שאליו האגס הנוטה נשא את קצהו — ואילו הגב, שנאסף פנימה, נמצא בקשתות של מערב האוקיינוס השקט. ה- 22.5° צפון של הקצה ברגע השחרור וה- 9.3° צפון של החותם הזה הם גדלים שונים: הראשון הוא הכיוון של מרכז הירח ממרכז כדור הארץ ברגע השחרור, השני הוא חותמו של הקצה שנאסף פנימה על פני השטח של היום, כ- 15° צפונית למשווה של מערכת הפסים; הם נמדדים במערכות ייחוס שונות, והקשר בין שתי המערכות — הצירים — הוא עבודה עתידית. האגס מעולם לא עזב את מסת כדור הארץ. הוא לא אבד בשחרור; לאחר השחרור ההתמיינות אספה אותו בחזרה אל כדור הארץ, בהדרגה, לאורך עשרות עד מאות מיליוני שנים — החלק הכבד שלו עמוק אל תוך כדור הארץ מתחת לבסיס האגס (חלק E), הצד הקדמי שלו אל הפסים של צפון האוקיינוס השקט, וגבו אל הקשתות של מערב האוקיינוס השקט. המסה עברה מגובה רב מחוץ לכדור הארץ אל עומק רב בתוכו. הבסיס נמצא מעל ה-LLVP של האוקיינוס השקט, אזור איטי גדול במעטפת התחתונה, בתחתית המעטפת — אזור רחב, הנראה בהדמיות סייסמיות, שגלי רעידות אדמה עוברים בו לאט יותר מאשר במעטפת שסביבו — במפות שפורסמו של האזור הזה, המשתרע מסביבות Hawaii דרומה; המרחק הנמדד מהבסיס אל מרכז האזור ואל שוליו מובא ב-E.4§. טבעם של האזורים העמוקים נשאר פתוח.



איור 4. אזור המקור. האזור המסומן, שמרכזו בסביבות 25° צפון, 165° מזרח בצפון-מרכז האוקיינוס השקט, הוא גב האגס, הנוטה מערבה; בסיסו היה מזרחה, לעבר אמריקה, ליד Kiritimati (1.9° צפון, 157.5° מערב) (B.1§). האזור נמצא בין השוליים הפונים לאסיה (130° מזרח) לבין השוליים הפונים לאמריקה (120° מערב). הקרקעית של היום צעירה מ-180 מיליון שנה; הקריאה מתייחסת לאסימטריה בין חצאי הכדור בליתוספירה שמתחתיה (מאמר 3, B.1§). קרדיט: מפת בסיס, © Google Maps, Google; סימונים של המחבר.

את איור 4 יש לקרוא כמבט מלמעלה על עצם נוטה. השטח המסומן בצפון-מרכז האוקיינוס השקט הוא המקום שבו גוף האגס שכב מעל כדור הארץ כשנטה לאחר מערבה; כף הרגל של האגס, המקום שבו עלה מכדור הארץ, הייתה מזרחה ממנו, ליד Kiritimati, סמוך לקו המשווה. שני השוליים הנזכרים בכיתוב תוחמים את אזור המקור בצד האסימטרי ובצד האמריקני.

מה שיש בידינו עכשיו: קליפת סיל שטוחה מעל הזנה פעילה, הנושאת כבר מכתשים מחומר חוזר, הנאספת פנימה מאזור בגודל האוקיינוס השקט, והמקום שבו האגס עמד מאוחר יותר ונטה.

B.2 שלב 2 — הגוף על קצה האגס

השאלה של סעיף זה היא צורת הגוף ברגע שבו הוא לראשונה גוף: מה גודלו, כיצד מתחלקים פני השטח שלו, ומה צפיפותו צריכה להיות. בשלב הביניים הגוף יושב על קצה האגס של C.7§, והקצה רחב: המגע הוא ברוחב 6,000 ק"מ. הגוף הוא כדור פחוס היושב על הקצה המעוגל של האגס. הכיפה התחתונה שלו מונחת על הקצה המעוקל ועוקבת אחריו — הקצה, בעל רדיוס עקמומיות של כ-4,000 ק"מ, חוזר לגוף כ-1,350 ק"מ מתחת לאמצע המגע — והכיפה העליונה שלו מתנשאת מעליו: שתי כיפות, אחת על השנייה, התחתונה עוטפת את הקצה. המספר 1,350 ק"מ נובע מהגיאוטרפיה: משטח מעוקל ברדיוס של כ-4,000 ק"מ, הנמתח על מיתר של 6,000 ק"מ, מתרומם באמצעו כ-1,350 ק"מ מעל קו השפה שלו. לכן תחתית הגוף אינה שטוחה; היא נדחפת מלמטה על ידי הקצה, כמו כובע שנמשך מטה על ראש. הגיאוטרפיה שלו, עבור מסת הירח המלאה:

גודל	על קצה האגס	כדור ברגע השחרור, 1,890	הירח היום, 1,737 ק"מ
כיפה עליונה	מ"ר 7.0×10^{13} (67%)	ק"מ	—

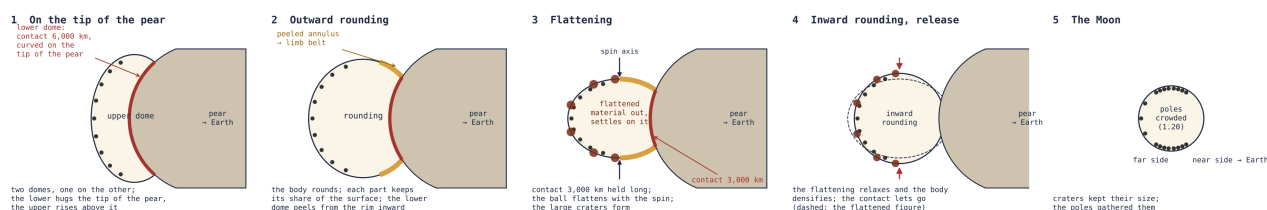
—	—	מ"ר 3.4×10^{13} (33%)	כיפה תחתונה, על הקצה
3.79×10^{13}	4.49×10^{13}	מ"ר 1.04×10^{14}	פני השטח כולם
2.20×10^{19}	2.83×10^{19}	מ"ק 5.65×10^{19}	נפח
3,344	2,600	ק"ג/מ"ק 1,300	צפיפות עבור מסת הירח
—	—	ק"מ 3,650	גובה הכיפה העליונה מעל שפת המגע

טבלה: הגיאומטריה של הגוף על קצה האגס, בהשוואה לכדור ברגע השחרור ולירח של היום, לאותה מסה.

הטבלה משווה את אותה מסה — המסה המלאה של הירח — בשלושה מצבים. קוראים אותה לאורך השורה, מהמצב הראשון אל האחרון: הגוף נעשה קטן יותר וצפוף יותר. על קצה האגס הוא גדול וקל, ונפחו כפי שניים וחצי מנפחו היום; ככדור ברגע השחרור רדיוסו 1,890 ק"מ וצפיפותו 2,600 ק"ג/מ"ק; היום רדיוסו 1,737 ק"מ וצפיפותו 3,344 ק"ג/מ"ק. את העמודה הראשונה קוראים מלמעלה למטה: שני שלישים מפני השטח על קצה האגס הם הכיפה העליונה, ושליש הוא הכיפה התחתונה המונחת על הקצה. שני החלקים האלה הם נקודת המוצא של כלל התרגום של B.4§.

גובה הכיפה העליונה נקבע על ידי הצפיפות, משום שהמסה קבועה: ככל שהכיפה גבוהה יותר מעל אותו מגע, הנפח גדול יותר והצפיפות נמוכה יותר. לאותה מסה מעל אותו מגע יש צפיפות של כ-2,000 ק"ג/מ"ק אם הכיפה העליונה שלה גבוהה כחצי כדור, 3,000 ק"מ, ואת ה-3,344 של היום אם היא בגובה 2,450 ק"מ, הנמוך ביותר האפשרי (איור 7) — הנמוך ביותר, משום שגוף בעל מסת הירח אינו יכול להיות צפוף יותר מהירח כיום. אנו מאמצים את הכיפה הגבוהה: 1,300 ק"ג/מ"ק הוא מצב השיגור המוקצף שמבחן הלחץ של חלק A דורש — לעומת ה-1,500 שאומץ שם — והיא הצפיפות שבה מתחילה הפחיסות של מאמר 7, הקטבים. "מוקצף" פירושו התך מלא בבועות גז, כמו בצק תופח שקל יותר מהקמח והמים שממנו הוא עשוי; עמוד קל הוא מה שלחץ המקור של חלק A יכול להרים עד קו הקורוטציה. הגוף מוקצף, והכיפה העליונה שלו מתנשאת גבוה.

הכיפה התחתונה היא המגע עם גוף האם: 3.4×10^{13} מ"ר. בשלב זה הכבידה העצמית של הגוף — המשיכה של מסתו שלו, המחזיקה אותו יחד — קטנה לעומת המתיחה הגאותית של גוף האם, ההפרש בין משיכת כדור הארץ בצד הקרוב של הגוף לבין משיכתו בצד הרחוק, הנוטה למתוח אותו החוצה: היחס של C.4§ הוא כ-0.11 (כאשר גודל הגוף נלקח כגובהו המלא, כ-5,000 ק"מ, ומרכזו כ-13,000 ק"מ ממרכז כדור הארץ; עבור הכדור השקול, 2,381 ק"מ, היחס היה כ-1), כך שמשיכתו העצמית של הגוף היא כתשיעית מהמתיחה לאורך גובהו המלא. לכן הגוף מוחזק; הוא כיפה על הקצה, ועדיין לא גוף בפני עצמו.



Schematic, not to scale. The 6,800 km base is curved on the tip of the pear, not flat; peeling from 6,800 to 3,800 km is one continuous process.

איור 5. שלבי החלק החיצוני (חלק B), על קצה האגס: (1) הגוף יושב על הקצה הרחב, שתי כיפות אחת על השנייה, התחתונה על הקצה המעוקל; (2) ההתעגלות החוצה, שבה כל חלק שומר על חלקו בפני השטח והכיפה התחתונה מתקלפת מהשפה פנימה (C.4a§); (3) הפחיסות עם הסיבוב, שבה נוצרים רוב המכתשים הגדולים; (4) ההתעגלות פנימה, כשהפחיסות נרפית והגוף מתהדק, והשחרור בקו הקורוטציה; (5) הירח: המכתשים שמרו על גודלם והקטבים אספו אותם (מאמר 7). סכמטי, לא בקנה מידה.

איור 5 הוא סיפורו של חלק זה בחמש תמונות, שיש לקרוא בסדר המספור שלהן. הלוחות שלו ממוספרים כתמונות ולא כשלבים: לוח (1) הוא שלב 2 של מאמר זה, לוח (2) הוא שלב 3, לוחות (3) ו-(4) הם שלב 4, ולוח (5) הוא הירח של היום. הביטוי תחילה בשתי הכיפות שבלוח (1) ובקו שבו הכיפה התחתונה פוגשת את הקצה; אחר כך עקבו אחר הקו הזה כשהוא מתכווץ פנימה בלוח (2), ואחר כך המתאר של הגוף כשהוא נפחם בלוח (3) ומתעגל שוב בלוח (4). ההתעגלות פנימה מושלמת לפני שהגוף עוזב: עד השחרור הגוף היה עגול, והקליפה החיצונית שלו קשיחה (מאמר 2, B.7§: יחס צירים של 1.04 לכל היותר).

B.3 מה נע, ומה לא

קורא המדמיין קרום הנודד אלפי קילומטרים מכדור הארץ אל הירח ישאל איזה כוח נושא קרום למרחק כזה. הקליפה אכן נודדת, אך היא אינה נגררת על פני גוף האם: היא עולה עם גוף האגס, ובמקביל נפרדת לאט מן הסימה שמתחתיה וגולשת במעלה האגס אל קצהו, אל תוך הגוף. כוחות הסיבוב מניעים אותה, בכיוון ההתמיינות החוצה, והשכבה ה"משומנת" שבין הסיאל לסימה מקלה על הגלישה בגזירה (C.10§). לכן הקצה מתנתק כגוף בפני עצמו. (האיסוף פנימה של B.1§ שייך לשלב 1, לפני הכיפה.)

מה שמתכווץ במהלך שלב 3 הוא הטבעת של הכיפה התחתונה — הטבעת בתחתית הגוף שבין שפת המגע לבין מרכזו, פני השטח החשופים של הגוף, ולא הקליפה: משפה ברדיוס 3,000 ק"מ אל מגע ברדיוס 1,500 ק"מ, כ-1,500 ק"מ של תנועה פנימה לאורך כל שלב 3, על אותו ממשק חלש. הכיפה דורשת מבנה ראולוגי שכבתי — "ראולוגי" במובן של האופן שבו כל שכבה זורמת תחת עומס: קליפה קשיחה וקרה ($\eta \gtrsim 10^{23}$ פסקל-שנייה, הערך שמונע ממכתש ברוחב 100 ק"מ להירפות בתוך 10^7 שנים ב- $g = 8.25$), מעל פנים נייד, כשהשכבה החלשה ביותר נמצאת בממשק ביניהם. כאן η היא הצמיגות, ההתנגדות של חומר לזרימה — לדבש צמיגות גבוהה מזו של מים, ולקליפה קרה צמיגות גבוהה מאוד משל שניהם; קליפה של 10^{23} פסקל-שנייה שומרת על צורת מכתש ברוחב 100 ק"מ עשרה מיליון שנים בלי לשקוע. הקילוף של המגע מ-6,000 ל-3,000 ק"מ וההתעגלות של הגוף נמשכו מיליוני שנים: איטי בהתחלה, לאורך מאות מיליוני שנים, ומהיר יותר לקראת הסוף, לאורך עשרות מיליונים; לוח הזמנים של הקליפה הוא לוח הזמנים של העלייה.

הכבידה של הגוף המתפתח מחזיקה את הקליפה צמודה לפני השטח שלו. בראש הכיפה העליונה הכבידה העצמית של הגוף היא כ-0.9 מ"ש² (עבור הכדור השקול, 2,381 ק"מ ב-1,300 ק"ג/מ"ק — הכדור בעל אותו נפח), והיא עולה ל-1.37 מ"ש² בגוף הסגור ברדיוס 1,890 ק"מ. על משטח שמרכזו במרכז המסה של הגוף, הכבידה הזאת ניצבת לפני השטח — היא מכוונת ישר מטה אל תוך הגוף — ומחזיקה את הקליפה; היא אינה נחשבת כוח מניע משיקי; הגלישה של הסיאל אל הקצה מונעת בכוחות הסיבוב.

B.4 שלב 3 — ההתעגלות החוצה, המגע וכלל התרגום

סעיף זה עונה על השאלה המרכזית של חלק B: כשהגוף הפחוס נעשה כדור, לאן הולך כל חלק של פני השטח שלו? הגוף הוא העומס על קצה האגס של C.7§, ושלביו 3 ו-4 הם אותו קצה הנמשך החוצה בזמן שהגוף עליו מתעגל ומשתחרר. ככל שהכבידה העצמית שלו גדלה, הגוף מתעגל החוצה (C.4§): הגוף הפחוס נעשה כדור, בנפח קבוע וללא התפשטות. המגע מצטמצם מ-6,000 ל-3,000 ק"מ ונשאר מחובר; שאר הכיפה התחתונה, הטבעת שבין השניים, מתנתקת לאט, מתקלפת מהשפה פנימה יחד עם הסיאל שעליו ישבה (C.4a§) — כמו כדור רך וחצי ריק, הלחץ על ראשה של תמיכה מעוגלת, שמתקלף ממנה מהשוליים פנימה כשמנפחים אותו. התהליך רציף ואורך זמן. בסופו הגוף נתמך על דיסקה רחבה דיה כדי שהחיבור יהיה שכבה ולא צוואר (C.5§).

מה שפני השטח של הגוף נעשים על הכדור נקבע בכלל אחד: בהתעגלות החוצה כל חלק שומר על חלקו בפני השטח.

הכלל אומר שחלק המכסה 7% מפני השטח של הגוף הפחוס מכסה 7% מפני השטח של הכדור, וכן הלאה לכל חלק. על כדור, חלק מפני השטח הנמדד מנקודה אחת הוא זווית קבועה מאותה נקודה: כיפה המכסה 7% מכדור מגיעה לכ-31° ממרכזה, וכיפה המכסה 33% מגיעה לכ-70°. הנקודה שממנה נמדדות הזוויות היא מרכז המגע — קצה האגס, בכ-22°–24° צפון. האזורים מחושבים סביב 24.1° צפון 335.2° מזרח, מרכז המגע כפי שהמחבר שרטט אותו, 34.0° מהנקודה התת-ארצית. הטבלה מחילה את הכלל על שלושת חלקי הגוף:

חלק על הקצה	שטח	חלק יחסי	זווית ממרכז המגע	על הירח
המגע, 3,000 ק"מ	מ"ר 7.3×10^{12}	7%	0°–31°	כיפה בצד הקרוב ברוחב של כ-1,900 ק"מ
הטבעת המתקלפת	מ"ר 2.7×10^{13}	26%	31°–70°	החגורה
הכיפה העליונה	מ"ר 7.0×10^{13}	67%	70°–180°	הצד הרחוק והחגורה החיצונית

טבלה: כלל התרגום — שלושת חלקי הגוף על קצה האגס ומקומם על הכדור.

צבעי הטבלה עוברים מכדור הארץ החוצה: אדום למגע, החלק שנגע בכדור הארץ עד הסוף; כתום לטבעת, שהתקלפה במהלך ההתעגלות; כחול לכיפה העליונה, שהייתה חשופה לחלל מההתחלה. כל שורה נקראת לאורכה: החלק, שטחו על קצה האגס, חלקו בשלם, והזוויות שהוא תופס על הכדור. המגע והטבעת יחד הם 33% של הכיפה התחתונה; הכיפה העליונה היא 67% הנותרים. כיפה של 31° על הירח של היום רוחבה כ-1,900 ק"מ.

לכדור יש פני שטח קטנים יותר מאשר לגוף הפחוס בעל אותו נפח — 7.1×10^{13} מ"ר לעומת 1.04×10^{14} , גורם 0.68 בשטח ו-0.83 באורך — ומאחר שכל חלק שומר על חלקו, השינוי זהה בכל מקום: הוא אינו מזיז שום אזור ושום מכתש ביחס לאחר. לכדור יש תמיד פני השטח הקטנים ביותר לנפחו; ההתעגלות החוצה מקטינה אפוא את פני השטח, אך באופן אחיד, כמו תצלום מוקטן השומר כל דמות במקומה. רצף החשיפה של הבנייה כתוב על הירח כשלושה אזורים קונצנטריים סביב מרכז המגע:

- הכיפה של כ-31° הייתה המגע; היא לא הייתה מכוסה כולה עד השחרור: Serenitatis התקלפה ממנה ראשונה, Imbrium-I נותקה אחרונה.
- החגורה מ-31° עד 70° הייתה הטבעת המתקלפת — הסיאל שעליו ישב הגוף, שהתקלף מגוף האם כשהמגע הצטמצם מהשפה אל הדיסקה — ונחשפה במהלך ההתעגלות החוצה.
- הצד הרחוק, מעבר ל-70°, היה הכיפה העליונה: קליפה לכל אורכו, חשוף מהשלב השטוח, והמכתשים שלו נישאו מעלה.

הזוויות נשמרות לאורך השלבים המאוחרים, משום שמה שבא אחרי ההתעגלות החוצה — הפחיסות וההתעגלות פנימה (מאמר 7) — משנה את הקטבים לעומת קו המשווה, ולא את הצד הקרוב לעומת הצד הרחוק. בפחיסות הסיבוב מרחיב את הגוף בקו המשווה שלו ומנמיך אותו בקטבים, ובהתעגלות פנימה הדבר מתבטל; שני התהליכים פועלים באופן סימטרי סביב ציר הסיבוב ומשאירים את החלוקה בין הצד הקרוב לצד הרחוק במקומה. המאמר מוסר את האזורים למאמר 11, *הדרישות*, כדרישה שתיבדק מול האגנים; זיהוי הכיפה עם אזור Procellarum הוא של מאמר 11, לא של מאמר זה.

שני האזורים על הירח היום. את בסיס הגבעה ואת המגע האחרון אפשר לשרטט שניהם על הצד הקרוב של היום, מתוך קווי המתאר שלהם במפת LROC (המפה של מצלמת Lunar Reconnaissance Orbiter):

אזור	רוחב בזמן הבנייה	מרכז היום	ימות הצד הקרוב בתוכו
------	------------------	-----------	----------------------

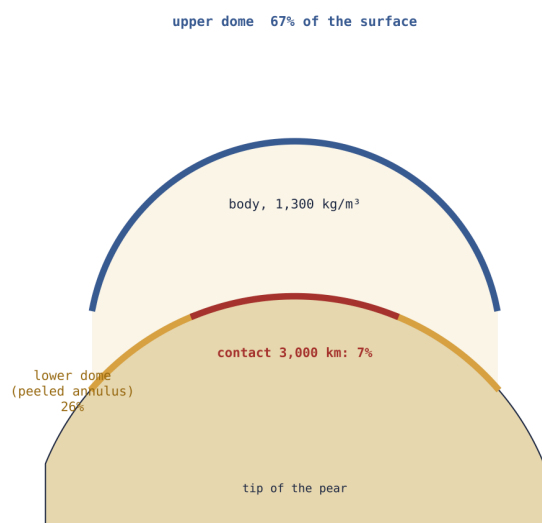
99%	16.6° מזרח 13.1° צפון,	ק"מ 6,000	הגבעה — בסיס הבליטה
66%	24.1° מזרח 335.2° צפון,	ק"מ 3,000	המגע — 3,000 הק"מ האחרונים
	37.6° מזרח 340.0° צפון,	—	Mare Imbrium — פתח ההזנה האחרון

טבלה: שלושת האזורים המקוננים על הצד הקרוב של הירח היום.

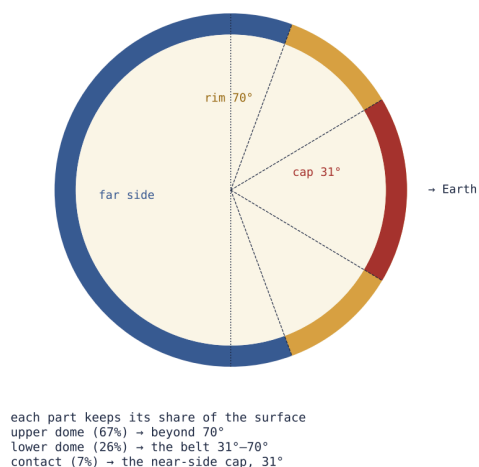
הטבלה מקננת שלושה אזורים, כל אחד בתוך זה שמעליו. הגבעה, בסיס הבליטה שעליו יושב הגוף בשלב 2, מכילה 99% מימות הצד הקרוב — המישורים הכהים של הצד הקרוב; המגע, 3,000 הק"מ האחרונים שנשארו מחוברים, מכיל שני שלישים מהם; ו-Mare Imbrium נמצא בתוך המגע.

שני האזורים נמצאים בצד הקרוב, המגע בתוך הגבעה, ו-Mare Imbrium בתוך המגע: הלחץ וההזנה שעלו מפנים כדור הארץ נכנסו אל הגוף דרך Imbrium ו-Serenitatis; Serenitatis התקלפה ראשונה, ו-Imbrium נשארה מחוברת עד הניתוק — הקשר האחרון. Imbrium נמצאת בתוך המגע, לא בהכרח במרכזו. הזוויות של הכלל נמדדות סביב מרכז המגע, 24.1° צפון 335.2° מזרח; הכלל קובע את גודל האזורים, וקווי המתאר קובעים היכן הם נמצאים היום. שני סוגי המידע מוחזקים בנפרד במכוון: הכלל הוא חישוב של חלקים יחסיים ואינו צריך מפה; קווי המתאר הם קריאה של המפה, והם אומרים היכן יושבים האזורים המחושבים.

A The body on the tip of the pear



B End of the outward rounding



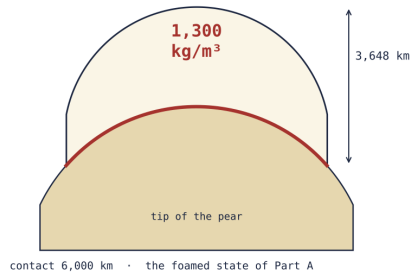
Areas: upper dome 7.0×10^{13} m², lower dome 3.4×10^{13} (contact 0.73×10^{13}), Moon today 3.79×10^{13} . Pear-tip curvature 4,000 km. Angles from the sub-Earth point.

איור 6. כלל התרגום של B.4. A: הגוף על קצה האגס, עם שלושת חלקיו — הכיפה העליונה (67% מפני השטח), הטבעת של הכיפה התחתונה (26%), והמגע ברוחב 3,000 ק"מ שנשאר מחובר (7%). B: הכדור בסוף ההתעגלות החוצה, כשכל חלק שומר על חלקו: המגע — כיפה בצד הקרוב של כ-31°, הטבעת — חגורה מ-31° עד 70°, הכיפה העליונה — כל השאר.

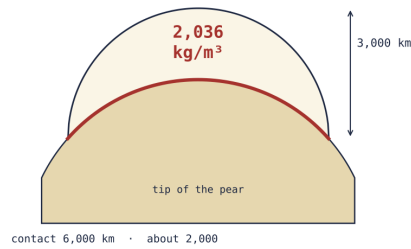
איור 6 הוא טבלת כלל התרגום בשרטוט. בלוח A, זהו כל אחד משלושת החלקים של הגוף הפחוס; בלוח B, מצאו את אותו חלק על הכדור. מה שצריך לראות הוא ששום דבר אינו משנה את סדרו: המגע, במרכז התחתית, נעשה הכיפה במרכז הצד הקרוב; הטבעת שסביבו נעשית הטבעת שסביב הכיפה; והכיפה העליונה עוטפת את שאר הכדור.

The same mass, one lunar mass, sitting on a 6,000-km contact. The higher the upper dome, the larger the volume and the lower the density.

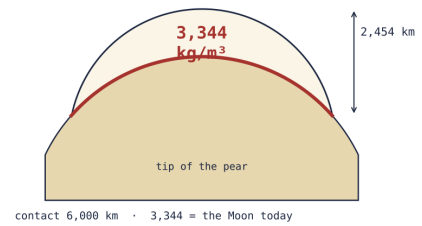
A Adopted: a tall upper dome



B As high as a hemisphere



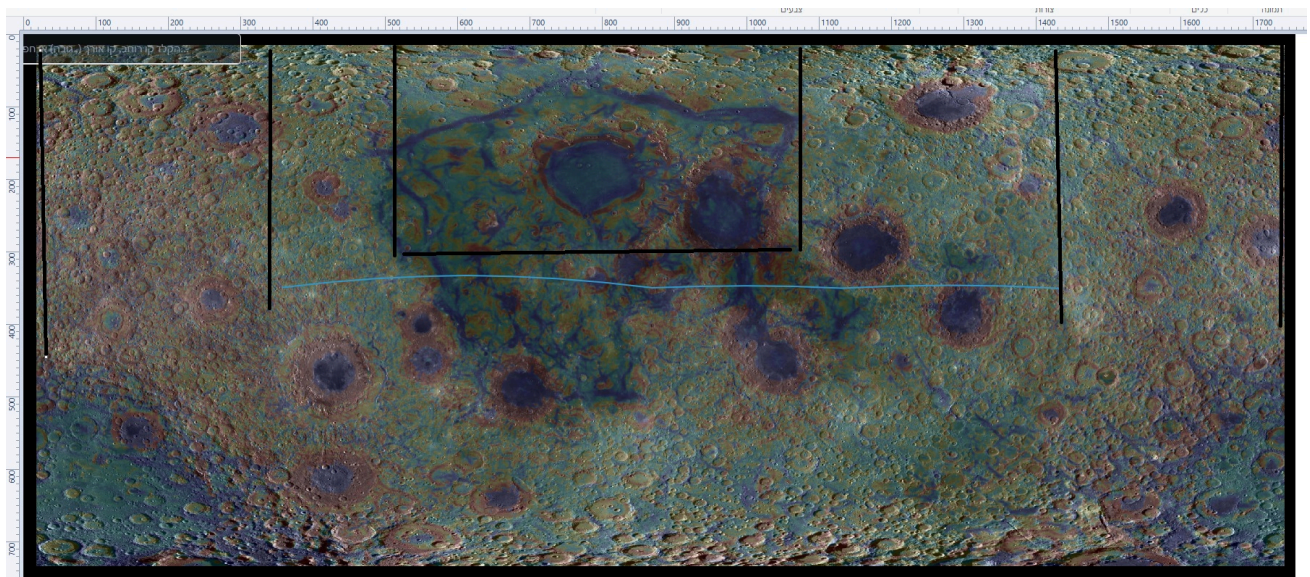
C The lowest possible



Height of the upper dome above the rim of the contact. Pear-tip curvature 4,000 km: the tip enters the body about 1,350 km under the contact.

איור 7. גובה הכיפה העליונה וצפיפות הגוף, עבור מסת הירח המלאה מעל המגע ברוחב 6,000 ק"מ של שלב 2 (B.2§). הכיפה הגבוהה המאומצת, כ-3,650 ק"מ מעל השפה, נותנת את 1,300 ק"ג/מ"ק המוקצפים של חלק A; כיפה בגובה חצי כדור נותנת כ-2,000; הנמוכה ביותר האפשרית, 2,450 ק"מ, נותנת את 3,344 של היום.

איור 7 מציג את היחס שבו נעשה שימוש ב-B.2§ בין גובה הכיפה העליונה לבין צפיפות הגוף. הביטוי בשלושת המקרים הנזכרים בכיתוב. ככל שהכיפה גבוהה יותר, הצפיפות נמוכה יותר; הכיפה המאומצת עומדת בקצה הקל, שבו לגוף יש הצפיפות המוקצפת שחלק A דורש.



איור 8. כלל התרגום משורטט על מפת GRAIL: בסיס הגוף של שלב 2 (קו כחול) והמגע של שלב 3 (קו שחור). הקווים ציוריים; הכלל עצמו ממקם את שפת הכיפה התחתונה בכ-70° ואת המגע בכ-31° ממרכז המגע, 24.1° צפון 335.2° מזרח (איור 6). קרדיט: שרטוט המחבר על LROC QuickMap.

איור 8 מעביר את הכלל אל הירח האמיתי. GRAIL, משימת הכבידה של שתי החלליות התאומות, מיפתה את שדה הכבידה של הירח, ובאמצעותו את עובי הקרום שלו. הקו הכחול מסמן היכן נמצא היום בסיס הגוף של שלב 2 — שפת הכיפה התחתונה; הקו השחור מסמן את המגע האחרון. הביטוי בימות הכהים: כמעט כולם נופלים בתוך הקו הכחול, ורובם בתוך השחור.

מה שיש בידינו עכשיו: כלל ההופך את הגיאומטריה של הגוף על קצה האגס למפה של הירח — כיפה בצד הקרוב, חגורה סביבה, וצד רחוק — שבה כל אזור נחשף בזמן אחר.

B.5 הפתחים

הקליפה אינה רציפה. ההזנה של חלק A מגיעה אל הכיפה דרך פתחים, וחומר נפלט דרכם; בשלב 1 הם הימות של הקליפה השטוחה, בשלב 2 אלה שעל הכיפה העליונה נחשפים כשהיא עולה, ואלה שמתחת לכיפה התחתונה נשארים מכוסים עד השחרור. לכן הפתחים נבדלים זה מזה במועד חשיפתם ובמה שעבר דרכם. הפתחים שעל הכתר ועל הצלע היו פעילים בזמן שהיו חשופים, ודרכם נפלט חומר החוצה. הפתחים שמתחת לכיפה התחתונה — הימות של הצד הקרוב — היו פתחי מעבר פנימיים: כל עוד היו מכוסים הם העבירו את הלחץ של כדור הארץ דרך האגס אל הימות שאנו רואים, ומשם אל הירח, וחומר עבר דרכם כמו דרך צינור.

Serenitatis נחשפה לפני Imbrium, וכשנחשפה היא עדיין הייתה פעילה קלות: רואים נתזים בטבעת שסביבה, אבל לא רואים מכתשים ענקיים. מכתשים גדולים נוצרים מחומר גדול, שיוצא בכוח הלחץ; המכתשים הקטנים בטבעות שסביב הימות מקורם בבעבוע וביציאת נתזים, שרובם חוזרים אל הימה, וחלק קטן נוחת בשולי הימה ומשאיר שם רישום. Imbrium נחשפה אחרונה. ברגע שנחשפה נפסק הלחץ התוך-ירחי — לא מיד, אבל מהר מאוד — ואיתו פסקו הפצפוצים של הימות הירחיות. כדור הארץ, לעומת זאת, המשיך בפעילותו והמשיך להתיז חומר לכל עבר, רובו קטן; חלקו חזר אל כדור הארץ, וחלקו נחת על הירח. לכן רואים פיזור מלא של מכתשים קטנים על כל הירח, כולל הצד הקרוב (C.11§).

צורתה התצפיתית של התמונה הזאת — אילו אגנים הם מאיזה סוג, ואיזה חותם כל אחד אמור לשאת — היא עניין של התייעוד הירחי, והיא נבחנת במאמר 11; כאן הפתחים נכנסים רק כמקומות שבהם ההזנה של חלק A פוגשת את הקליפה של חלק B.

B.6 התייעוד הנישא על הגוף

מכתש שנוצר בקליפה על ידי חומר חוזר בזמן שהקליפה הייתה חשופה בשלב 1, או על הכיפה העליונה בשלב 2, נע עם הקליפה כשהגוף מתעגל. זוהי סטרטיגרפיה — קריאת סדר מתוך מה שמונח על מה — ולא פיזיקה חדשה: $t_{\text{crater}} < t_{\text{cover}}$ עבור המקטע הנדון. במילים: מכתש שנוצר לפני שפיסת פני השטח שלו כוסתה או נישאה, נישא איתה. התייעוד שורד אם הקליפה שומרת על צורתה, וזו הדרישה שהופכת אותה לקליפה: צמיגות בסדר גודל של 10^{23} פסקל-שנייה או יותר בפני השטח, לאורך 10^7 שנות העלייה. הקליפה התקשחה מוקדם, בחלק הראשון של הסערה המאגמטית; קליפה קשיחה לא נמתחה כשהגוף גדל ולא נדחסה כשהתעגל, והמכתשים שעליה שמרו על גודלם.

התייעוד נכתב בשלושה שלבים:

בהתעגלות החוצה המכתשים שכבר קיימים משתנים יחד עם פני השטח, באופן זהה בכל מקום, ומכתשים חדשים ממשיכים להגיע; הקטבים נוצרים.

בפחיסות שבאה אחריה נוצרים רוב המכתשים, והגדולים שבהם: המיון התקדם, החומר הנפלט עשיר במים, והקטבים, שכבר נוצרו, מקבלים יותר.

בהתעגלות פנימה, כשהפחיסות נרפית והגוף כולו מתהדק, המכתשים שומרים על גודלם ופני השטח שביניהם נסגרים, בעיקר בקטבים, שאוספים אותם (מאמר 7) — כמו שהרווחים בין כפתורים התפורים על בד נסגרים כשהבד נאסף, בעוד הכפתורים נשארים באותו גודל.

החגורה והכיפה היו מתחת לכיפה התחתונה ולא קיבלו מכתשים לפני חשיפתן; האוכלוסיות העתיקות ביותר שלהן צעירות מאלה של הצד הרחוק. צד רחוק שאוכלוסייתו העתיקה ביותר היא הצפופה ביותר, חגורה שבה היא פחות צפופה, וכיפה שבה היא הדלילה ביותר — זה מה שהכלל חוזה, והדבר מנוסח בחלק D יחד עם המבחן שלו. זהו המבחן שכלל התרגום מוסר לירח: את הסדר שבו נחשפו האזורים יש לקרוא בסדר של המכתשים העתיקים ביותר שלהם.

מאחורי הקלעים. בגרסה מוקדמת של חלק זה הצד הרחוק נסגר לשליש משטחו, המכתשים שלו התכווצו בגורם 0.58 וצפיפותם עלתה פי שלושה. המכתשים נשאלו ישירות, במדדים ששינוי קנה מידה היה מזיז — קוטר המעבר ממכתשים פשוטים למורכבים, המכתשים הגדולים ביותר בשטח שווה, הישנים לעומת הטריים (מאמר D.5§, 7). מכתשים קטנים הם קערות פשוטות; מעל קוטר מסוים מתפתחים בהם קירות מדורגים ופסגות מרכזיות, וקוטר המעבר הזה היה משתנה אילו פני השטח הנושאים אותם היו נדחים. בין הרמות של הצד הרחוק לבין הרמות של הצד הקרוב הם אינם מוצאים הבדל בקנה המידה: המעבר נמצא ב-16.5–17.1 ק"מ בצד הרחוק וב-14.3–15.1 ק"מ בצד הקרוב. הגיאומטריה של B.2–B.4§§ נובעת מכך.

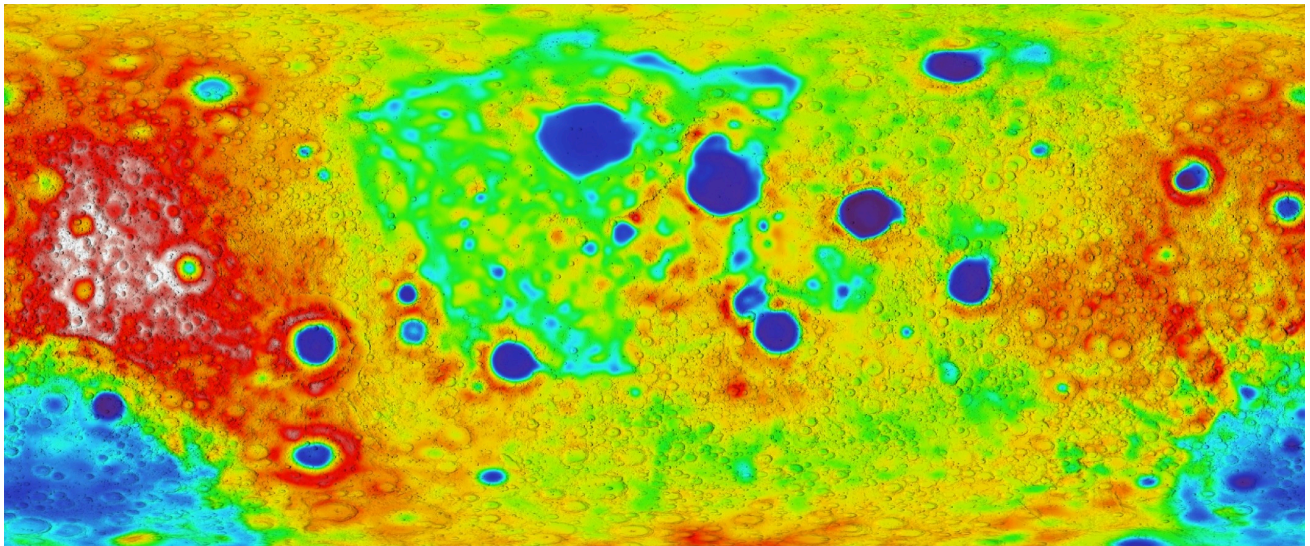
B.7 מאזן המסה והעובי

השאלה האחרונה של חלק B היא אם הקרום שיש לירח בפועל יכול להיווצר בדרך זו, הן במסתו והן בעוביו הלא-אחיד. כפי שהוא נמדד היום, קרום הצד הרחוק — בעובי של כ-55 ק"מ לפי GRAIL, ובצפיפות 2,550 ק"ג/מ"ק על פני חצי הכדור הרחוק — הוא כ- 2.6×10^{21} ק"ג, 3.5% מהירח (גרסה קודמת נתנה 2.7×10^{21} ק"ג ו-3.6%; חושב מחדש במאמר B.3§, 11). אלה תצפיות על הקרום כפי שהוא היום, ולא עובי של קליפה במודל. במודל, קרום הצד הרחוק הוא שכבות רבות של סיאל דחוס. שני מקורות בנו אותו, שכבה על שכבה, על הכיפה העליונה: הסיאל של גוף האם, שגלש במעלה האגס על הסימה והצטבר בקצהו (C.10§), והחומר שנפלט דרך הפתחים וחזר שוב ושוב אל החלק הרחוק של הגוף.

הפליטה לא פסקה מעולם, והמיון — היפרדות החומר העמוק לפי צפיפות, הברזל הכבד שוקע והחומר הקל העשיר בנדיפים עולה — התקדם עם הזמן. ככל שהתקדם, החומר שיצא היה קל יותר ויותר ועשיר יותר בנוזלים: בפחיסות היו הזרימות של חומר ארצי קל יחסית, מלא מים. כל שכבה שהונחה קודם יצאה ממוינת פחות, ולכן נושאת יותר ברזל מהשכבות שמעליה. קרום הצד הרחוק שכבתי אפוא לפי גיל ולפי מיון, ותכולת הברזל שלו עולה עם העומק: ככל שהשכבה עמוקה יותר, היא נוצרה מוקדם יותר, והיא עשירה יותר בברזל — וצפופה יותר. זוהי תחזית, הנקראת מהרכב הפסגות המרכזיות של מכתשים מול עומק המקור שלהן (D.1§).

הצד הקרוב נושא קרום של 30–35 ק"מ — הסיאל המתקלף של הטבעת, ומעל המגע קרום שהוחלק על ידי חום וכבידה — עוד כ- 1.5×10^{21} ק"ג באותה צפיפות (גרסה קודמת נתנה 2×10^{21} ק"ג, שהיה מביא את הסך ל-6.3%); יחד הם 4–6% ממסת הירח שמודלי GRAIL נותנים לקרום כולו [4]. 94–96% הנותרים ממסת הירח הם החומר העמוק של חלק A — חלוקה שהוערכה מתמונת הקליפה הקודמת, ויש לחשב אותה מחדש עבור הקרום השכבתי — והמתכת שהפנים חייב לשאת לליבה של 1.4% היא דרישה מההזנה של חלק A, ולא מהקרום (מאמר R2, 11). המאזן מראה אפוא שהקרום ששני המקורות בונים מבחוץ הוא חלק קטן מהירח, ועיקר המסה הוא מה שחלק A מרים מבפנים.

הצד הרחוק עבה מהצד הקרוב (איור 9) משום ששניהם נבנו באופן שונה: הכיפה העליונה, החשופה לכל אורך הדרך, אספה סיאל וחומר חוזר שכבה על שכבה; הכיפה התחתונה נשאה רק את הסיאל שעליו ישבה, ובמרכזה איבדה אפילו אותו לחום המגע. הצד הקרוב דק ביותר במקום שבו הוא פתוח: הימות הם הפתחים של B.5§, והקרום מתחתיהם דק משום שהם פתחים. קרום הצד הרחוק הוא העתיק והעבה יותר; הגבול בין השניים נמצא בשפת הכיפה התחתונה (B.4§).



איור 9. עובי הקרום של הירח מכבידת GRAIL ומטופוגרפיית LOLA, הטלה גלילית שמרכזה ב-0° מזרח, בין 75° צפון ל-75° דרום (הצד הקרוב במרכז, הצד הרחוק בשני השוליים). כחול: קרום דק מתחת לאגני הצד הקרוב; אדום ולבן: הרמות העבות של הצד הרחוק. הצד הרחוק עבה בכ-10 ק"מ בין מרכז הצד הקרוב לבין הצד הרחוק, ובכ-8 ק"מ בממוצעים של חצאי הכדור (מאמר 11, B.88): במודל, קרום הצד הרחוק נבנה בשכבות על הכיפה העליונה; הצד הקרוב דק ביותר מתחת לימות, הפתחים. קרדיט: LROC QuickMap (NASA/GSFC/Arizona State University); עובי קרום GRAIL (NASA/JPL-Caltech/MIT; Zuber et al. 2013).

איור 9 הוא מפה של הירח כולו, פרושה שטוח, כשהצד הקרוב באמצע והצד הרחוק מפוצל בין שני השוליים; LOLA הוא מד הגובה הלייזרי שמדד את גובהי פני השטח. הביטוי בצבעים מהמרכז החוצה: כחול מתחת לימות הצד הקרוב, במרכז המפה, במקום שבו היו המגע והפתחים; אדום ולבן לעבר שני השוליים, בצד הרחוק, שבו הכיפה העליונה אספה את שכבותיה. המפה היא כלל התרגום כפי שהוא נראה בעובי הקרום.

מה שחלק B נתן: הקרום של הירח והמכתשים העתיקים ביותר שלו באו מהקליפה החיצונית של כדור הארץ, שעלתה כעורה של הכיפה העליונה; הגוף יושב כשתי כיפות על קצה האגס; כשהתעגל החוצה כל חלק שמר על חלקו בפני השטח, כך שהמגע נעשה כיפה בצד הקרוב, הטבעת המתקלפת — חגורה, והכיפה העליונה — הצד הרחוק. חלק C פונה עכשיו אל החיבור שמתחת לגוף — מה הוא נושא, וכיצד הגוף משתחרר.

חלק C — החיבור והשחרור

הבעיה

לאחר שנבדקה ההזנה, עלינו לדעת מה נושא את הגוף ומתי החיבור מפסיק להחזיק. אנו משתמשים בחישובים המשולבים של מסה, סיבוב וקו רחב, ומבחינים בין כוח, מאמץ ושינוי צורה.

חלק A הראה שהלחץ יכול להזין את הגוף, וחלק B עקב אחר פני השטח של הגוף מן השלב השטוח ועד ההתעגלות החוצה. חלק זה שואל את השאלה המכנית ששניהם משאירים פתוחה: מה מחזיק את הגוף אל כדור הארץ בזמן שהוא עולה, וכיצד הוא משתחרר. התשובה נבנית בשלבים. סעיפים C.1–C.3 מחשבים את העומס שהחיבור צריך לשאת ברגע השחרור ומראים מדוע צוואר צר אינו יכול לשאת אותו. סעיפים C.4–C.5 מראים כיצד מגע רחב וחם נושא את העומס, וכיצד הגוף מתחיל להיפרד בקו ומשתחרר כ-210 ק"מ מעבר לו, כשהמגע מתנגד רק מעט; C.5a§ נותן את חיפוש מרחק השחרור. סעיף C.6 מעביר את מצב השחרור אל מאמר 4 (המסלול). סעיפים C.7–C.9 מתארים את המבנה שמתחת למגע — בליטה אחת של כדור הארץ שנמשכת לצורת אגס, חלק מכדור הארץ שמוחזק בכבידה של כדור הארץ — על רוחבו, אורכו ומסתו. סעיפים C.10–C.11 חותמים במה שהגוף לקח עמו ובמה שכדור הארץ המשיך לעשות אחרי השחרור.

לאורך כל החלק מובחנות שלוש מילים. *כוח* הוא סך המשיכה או הדחיפה, בניוטונים. *מאמץ* הוא הכוח הזה מחולק בשטח שנושא אותו, בפסקלים (ג'יגה-פסקל אחד הוא בערך פי עשרת אלפים מלחץ האוויר בגובה פני הים). *שינוי צורה* הוא מה שחומר עושה כשהמאמץ עליו אינו מאוזן. חיבור רחב יכול לשאת כוח גדול במאמץ קטן, ואותו כוח עצמו יכול לקרוע חיבור צר.

C.1 הכיפה אינה נושאת את מלוא הלחץ של המקור

שאלת הסעיף פשוטה, וקל לענות עליה לא נכון: האם מלוא הלחץ של המקור העמוק דוחף את הכיפה החיצונית של הגוף? התשובה שלילית. בשיווי משקל הידרוסטטי — המצב שבו בכל עומק הלחץ של הנוזל נושא בדיוק את משקל מה שמעליו — הלחץ משתנה לאורך הדרך. הוא הגבוה ביותר במקור העמוק ויורד לאורך הדרך למעלה, כי בכל צעד הוא כבר נושא את משקל העמוד שמעליו. לכן אין להציב את לחץ המקור העמוק (כ-150 ג'יגה-פסקל, חלק A) כהפרש לחץ אחיד על פני הכיפה החיצונית.

קנה מידה שימושי הוא הלחץ שהגוף יוצר במשקלו שלו. לגוף כדורי הומוגני בעל מסה ירחית ובצפיפות 2,600 ק"ג/מ"ק מתקבל רדיוס של כ-1,890 ק"מ, ולחץ במרכז הנובע מכבידתו העצמית:

$$p_c = \frac{3Gm^2}{8\pi R_b^4} \simeq 3.37 \text{ GPa.}$$

כאן G הוא קבוע הכבידה, m מסת הירח ו- R_b רדיוס הגוף. זו התוצאה המוכרת לכדור אחיד: כל שכבה(18) נלחצת על ידי משקל השכבות שמעליה, והסכום מגיע לערכו הגדול ביותר במרכז. במילים: הכבידה העצמית של הגוף לבדה דוחסת את מרכזו לכ-3.37 ג'יגה-פסקל — בערך פי ארבעים פחות ממה שהמקור העמוק מחזיק. הלחץ שמגיע אל הגוף כבר הוצא, ברובו, על הרמת העמוד שמתחתיו.

הלחץ ההידרוסטטי יורד לעבר הגבול. עם זאת, קליפה בעובי סופי, זרימה פנימה, גאות וגאומטריה לא כדורית יכולות להטיל עומסים על הגבול הזה. לכן את הפרש הלחץ ואת המאמצים המקומיים יש לחשב; אין להניח

מראש שהם אפס. זו הסיבה שהסעיפים הבאים מחשבים את עומס החיבור ישירות, מתוך תנועת הגוף, ולא מתוך לחץ המקור.

2.c. מה נדרש מן החיבור בקו רוחב שאינו אפס?

הגוף מחובר לכדור הארץ ומסתובב עמו. כדי להמשיך להסתובב עם כדור הארץ במקום קבוע, יש לתת לו בכל רגע בדיוק את התאוצה שהתנועה המעגלית הזו דורשת; מה שהכבידה והסיבוב אינם מספקים, החיבור צריך לספק. סעיף זה מחשב את השארית הזו ברגע השחרור.

נגדיר את r כמרחק בין המרכזים, $K = G (M_E + m)$ ו- $m_r = M_E m / (M_E + m)$ היא מסת כדור הארץ; K מודד את הכבידה המשותפת של הזוג; ו- m_r היא המסה המצומצמת, המסה היחידה שמייצגת את שני הגופים כשתנועתם ההדדית מטופלת כתנועה של גוף אחד (היא קטנה במעט מ- m , כי גם כדור הארץ נע מעט סביב מרכז המסה המשותף). לתנועה מחוברת בקורוציה — הגוף מסתובב עם סיבוב כדור הארץ, באותו קצב זוויתי ω — בקו רוחב קבוע λ ובקצב קבוע ברגע הנבדק, תאוצות התמיכה הנדרשות הן:

$$a_r = \frac{K}{r^2} - \omega^2 r \cos^2 \lambda, \quad a_\lambda = \omega^2 r \sin \lambda \cos \lambda.$$

הראשונה חיובית כלפי חוץ, והשנייה מכוונת אל הקוטב בחצי הכדור הצפוני. במילים: a_r היא התמיכה (19) הרדיאלית — משיכת כדור הארץ K/r^2 פחות אותו חלק מן ההשלכה החוצה של הסיבוב שמכוון ישירות הרחק ממרכז כדור הארץ. a_λ היא התמיכה הצדדית. הרחק מן המשווה, ההשלכה החוצה של הסיבוב, $\omega^2 r \cos \lambda$, מכוונת הרחק מציר הסיבוב ולא הרחק ממרכז כדור הארץ; לכן חלק ממנה פועל לאורך הקרקע לעבר המשווה, כמו חרוז המושחל על חישוק מסתובב ונדחף אל החלק הרחב ביותר של החישוק. כדי להחזיק את הגוף בקו הרוחב שלו, החיבור צריך למשוך אותו לעבר הקוטב בתאוצה השווה לרכיב הצדדי הזה. הכוח הכולל הנדרש מן החיבור, בקירוב של שני גופים, הוא:

$$F_{\text{conn}} = m_r \sqrt{a_r^2 + a_\lambda^2}.$$

זו המסה המצומצמת כפול התאוצה המשולבת, כששני הרכיבים מחוברים בזווית ישרה. (20)

במצב השחרור שאומץ בסדרה — קו רוחב $\lambda = 22.5^\circ$, יממת כדור הארץ של 5.77 שעות, ומרכז המסה של הירח על קו הקורוציה בקו הרוחב הזה, $r = r_{\text{co}} \cos^{-2/3} \lambda$ (מאמרים 2 ו-4) — מתקבל:

$$T = 5.77 \text{ h}, \quad r = 17\,287 \text{ km},$$

$$(21) \quad a_r = 0, \quad a_\lambda = 0.559 \text{ m s}^{-2}, \quad F_{\text{conn}} = 4.06 \times 10^{22} \text{ N}.$$

קו הקורוציה הוא אוסף הנקודות שבהן גוף שמסתובב עם כדור הארץ כבר נע במהירות של מסלול חופשי (22) מעגלי; במשווה הוא נמצא ב- r_{co} , 16,399 ק"מ ביממה של 5.77 שעות, ובקו רוחב λ הוא רחוק יותר, ב- $r_{\text{co}} \cos^{-2/3} \lambda$, כלומר 17,287 ק"מ ב- 22.5° . על הקו הזה הדרישה הרדיאלית מתאפסת בדיוק, $a_r = 0$: הכבידה והסיבוב מאוזנים לאורך הרדיוס, והחיבור אינו צריך לדחוף או למשוך החוצה. הדרישה הצדדית אינה מתאפסת. היא 0.559 מ"ש², כשתי חמישיות מכבידת פני השטח של הגוף עצמו ברגע השחרור (1.37 מ"ש², B.38), וכשהיא מופעלת על המסה המצומצמת היא נותנת כוח של 4.06×10^{22} ניוטון. זה העומס שהחיבור צריך לשאת ברגע השחרור, והוא כולו צדדי.

כוח אומר מעט על חיבור עד שמחלקים אותו בשטח שנושא אותו. על חתך עגול ברדיוס b , המאמץ הממוצע השקול $F_{\text{conn}} / (\pi b^2)$ הוא:

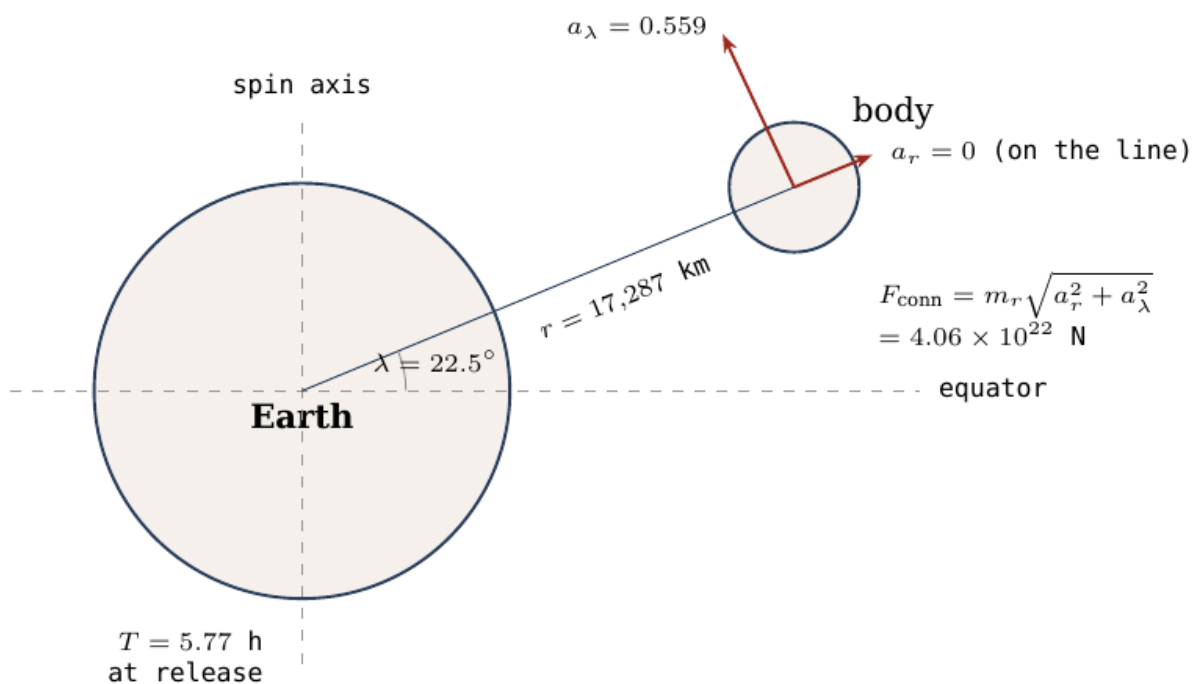
רדיוס החיבור	מאמץ ממוצע שקול
1,000 ק"מ	ג'יגה-פסקל 12.92

ג'יגה-פסקל 5.74	1,500 ק"מ
ג'יגה-פסקל 3.23	2,000 ק"מ

המאמץ הממוצע השקול על חתך עגול של החיבור, לפי רדיוס החתך, תחת עומס של 4.06×10^{22} ניוטון.

הטבלה נקראת מלמעלה למטה: המאמץ יורד כריבוע הרדיוס, כך שהכפלת רוחב החיבור מחלקת את המאמץ בארבע. ברדיוס של 1,500 ק"מ, חתך הניצב לכיוון הרדיאלי אינו דורש רכיב ניצב — על הקו האיזון הרדיאלי מתקיים — אבל דורש רכיב צדדי של כ-5.74 ג'יגה-פסקל. הרכיב הצדדי הזה הוא גזירה: הוא מנסה להחליק פן אחד של החתך על פני הפן השני. לחץ איזוטרופי על חתך כזה — לחץ שדוחף באותה מידה לכל הכיוונים, כמו בנוזל שקט — אינו מספק בעצמו את הרכיב הצדדי. צורה אחרת של החיבור עשויה לשנות את פיזור המאמצים, אבל את זה יש לחשב. כשמסת החיבור משמעותית, יש לכלול גם אותה ואת תנע הזרימה; הטבלה היא הערכת עומס לשני גופים, לא פתרון לחיבור מסיבי.

מדוע צוואר צר אינו יכול לעשות את העבודה. הטבלה מראה את הקושי של חיבור צר. צוואר ברדיוס 1,000 ק"מ היה צריך לשאת 12.92 ג'יגה-פסקל של גזירה, ומבחן המפרק של A.13§ נותן 46.04 ג'יגה-פסקל למעבר ברדיוס 500 ק"מ. צוואר שנושא את ההזנה הוא חם ומותך בחלקו, וחומר מותך אינו נושא גזירה מתמשכת כלל: תחת עומס צדדי קבוע הוא זורם. לכן צוואר צר אינו יכול להחזיק את הגוף ב- 22.5° ; הוא היה מתכופף וזורם לעבר המשווה. הפתרון אינו צוואר חזק יותר אלא מבנה רחב יותר, חלק מכדור הארץ עצמו, שמוחזק בכבידה של כדור הארץ ונושא את העומס הצדדי, כפי שכדור הארץ נושא את הריו. המבנה הזה הוא הבסיס הרחב של הכיפה והאגס שמתחתיה (C.4, §C.7§). איור 10 מראה את העומס שיש לשאת.



איור 10. תאוצות התמיכה הנדרשות מן החיבור ברגע השחרור בקו רוחב 22.5° , משוואות (19)–(22), חלק C. על קו הקורטוציה הרכיב הרדיאלי מתאפס, $a_r = 0$, אבל הרכיב הצדדי לעבר הקוטב נשאר, $a_\lambda = 0.559$ מ"ש², והעומס הוא 4.06×10^{22} ניוטון. לא בקנה מידה.

האיור נקרא מן הגוף: החץ האדום הקצר לאורך הרדיוס הוא הדרישה הרדיאלית, שהיא אפס על הקו; החץ האדום הארוך לעבר הקוטב הוא הדרישה הצדדית שנשארת. את השנייה החיבור צריך לספק.

C.3 כיצד הקורוטציה מנתקת את הגוף

הקורוטציה היא שמנתקת את הגוף, אבל לא כמתג שמופעל בנקודה אחת. סעיף זה מסביר מה קורה בקו. במישור המשווה, ובקירוב של גוף נקודתי, שינוי הסימן של $\omega^2 r - K/r^2$ משנה את כיוון התמיכה הנדרשת: בתוך הקו החיבור צריך להחזיק את הגוף כנגד משיכת כדור הארץ, ומעבר לו הוא צריך להחזיק אותו כנגד ההשלכה החוצה. בקו עצמו הדרישה עוברת דרך אפס. בקו רוחב שאינו אפס, גם כאשר $a_r = 0$, נשאר $a_\lambda \neq 0$. במצב השחרור הנקודה הזו היא הקו עצמו, 17,287 ק"מ ב-22.5°, ועומס החיבור שם עדיין 4.06×10^{22} ניוטון.

לכן קו הקורוטציה הוא המקום שבו כיוון הדרישה הרדיאלית מתהפך; זה גם המקום שבו הגוף מתחיל להיפרד. החיבור נכנע מעט מעבר לו, כשהוא כבר אינו יכול להעביר את הכוח, את מומנט הכוח ואת שטף התנע הנדרשים. טמפרטורה גבוהה והתכה עשויות להקטין את התנגדותו לשינוי צורה; הלחץ יכול לתרום לדחיפה; ההתעגלות משנה את צורת המגע ואת מסלול המאמצים. החימום, הלחץ וההתעגלות פועלים יחד באותה מערכת. הסעיפים הבאים מראים כיצד הם פועלים יחד בקו: הקו קובע היכן המשיכה הרדיאלית נטו פונה החוצה, ומעבר לו הגוף, כשהמגע מתנגד רק מעט, נמשך החוצה ומשתחרר כ-210 ק"מ אחרי הקו (C.5–C.5a§).

C.4 ההתעגלות החוצה וחיבור רחב

ההתעגלות היא תגובה של הצורה לכבידה העצמית, לגאות, לסיבוב ולראולוגיה (האופן שבו חומר זורם תחת עומס). גוף המוחזק יחד בכבידתו שלו נוטה להפוך לכדור; הגאות של כדור הארץ מושכת אותו לצורה מוארכת לאורך הקו שמחבר בין השניים; הסיבוב פוחס אותו; והצמיגות שלו קובעת באיזו מהירות הוא יכול להיענות למשיכות האלה. ההשוואה:

$$\frac{Gm}{R_b^2} > \frac{2GM_E R_b}{r^3}$$

נותנת הערכה מקומית של התחרות בין הכבידה העצמית למתיחה הגאותית. האגף השמאלי הוא הכבידה (23) של הגוף עצמו על פני שטחו, שמחזיקה אותו יחד. האגף הימני הוא המתיחה הגאותית לרוחב הגוף: כדור הארץ מושך את הצד הקרוב חזק יותר מן המרכז, ואת המרכז חזק יותר מן הצד הרחוק, וההפרש על פני רדיוס אחד של הגוף הוא $2GM_E R_b / r^3$. כשהאגף השמאלי גובר, הגוף מחזיק את עצמו; כשהאגף הימני גובר, הגוף מוחזק רק על ידי מה שהוא נשען עליו. בשלב 2, על הקצה הרחב, היחס בין השניים הוא כ-0.11 (B.2§): הגוף הוא עדיין כיפה על הקצה, עדיין לא גוף בפני עצמו. הישרדות במסלול וקריעת החיבור הן שתי הדרישות שמאמר 2 מציב לגוף המשוחרר, וההשוואה הזו היא המקום שבו הן נכנסות.

החיבור הרחב יכול להימתח ולהיפרד תוך כדי זרימה ושינוי צורה, בלי להיצר תחילה לצוואר. זה ההבדל המרכזי מצביטה: טיפה שיוצאת ממזרק נעשית דקה לחוט ונקרעת, אבל שכבה רחבה ורכה שנמשכת לשני כיוונים נפתחת על פני כל רוחבה בבת אחת (C.5§).

סדר שינויי הצורה קבוע. הגוף השלים את ההתעגלות החוצה זמן רב לפני השחרור, כשעדיין הסתובב עם כדור הארץ; אחר כך נפחס עם הסיבוב, והפחיסות וההתעגלות פנימה שהרפתה אותה התרחשו שתיהן בזמן שהגוף היה מחובר. בהתעגלות פנימה ירד יחס הצירים מ-1.69 בשיא הפחיסות ל- $a/c \simeq 1.2$ בשלב המחובר המאוחר (מאמר 7, הקטבים). עד השחרור הגוף היה עגול, וקליפתו החיצונית קשיחה (מאמר 2, B.7§: יחס צירים של 1.04 לכל היותר). המאמצים המפורטים והתפתחות הגאומטריה עדיין צריכים להיפתר. המגע בתמונה הזו הוא הדסקה בת 3,000 ק"מ שנשארה מן הכיפה התחתונה של הגוף בשלב 3 (חלק B.4); רוחבה, רדיוס של 1,500 ק"מ, הוא ה- R_c של חישוב השחרור ב-C.5§.

מדוע הבסיס הרחב יכול לעשות את העבודה. שני דברים משתנים כשהחיבור הוא הבסיס הרחב של הגוף ולא צוואר. העומס מתפזר על פני דסקה ברדיוס 1,500 ק"מ, ולכן המאמץ הממוצע יורד ל-5.74 ג'יגה-פסקל של הטבלה ב-C.2§, במקום לעלות ככל שהרדיוס מצטמצם. ומתחת לדסקה התמיכה אינה חוט אלא חלק רחב של

כדור הארץ עצמו, האגס של C.7§, חלק מכדור הארץ שמוחזק בכבידה של כדור הארץ. המגע צריך רק להעביר את העומס אל האגס, על פני מרחק קצר; האגס נושא אותו למטה אל כדור הארץ.

C.4a קילוף: הגוף עוזב עם הסיאל שעליו ישב

סעיף זה מתאר מה קורה על פני חלקי הכיפה התחתונה שאינם המגע הסופי. הגוף ישב מן ההתחלה על השכבה הסיאלית של גוף האם — השכבה החיצונית הקלה, העשירה בצורן ובאלומיניום (C.10§) — הוא גדל עליה, והוא עזב איתה. התמונה היא כדורגל או כדורסל ריק מאוויר, שנלחץ על הראש המעוגל של מעמד ומנופח בעודו על המעמד: כשהוא מתנפח ומתעגל, הדופן שנוגעת במעמד מתקלפת ממנו, מן השוליים פנימה, ומתעגלת יחד עם שאר הכדור. כאן המעמד הוא קצה האגס.

על פני הבסיס בן 6,000 הק"מ הניתוק הוא קילוף. כשהגוף התעגל החוצה (C.4§), המגע הצטמצם משולי הכיפה התחתונה, ברוחב 6,000 ק"מ, אל הדסקה בת 3,000 הק"מ (B.4§); הקילוף איטי, והדסקה נשארת מחוברת עד הסוף. לרוחב הטבעת הזו — הטבעת שבין השוליים של 6,000 ק"מ לבין הדסקה של 3,000 ק"מ — הגוף לא נקרע מגוף האם: הסיאל שמתחתיו התקלף מן הסימה שמתחתיו (השכבה הצפופה יותר, העשירה במגנזיום, שמתחת לסיאל), לאורך הגבול המשומן בין שתי השכבות (C.10§), והלך עם הגוף. הסיאל המקולף הזה הוא החגורה של היום שבין 31° ל- 70° ממרכז המגע (B.4§).

המגע בן 3,000 הק"מ הוא מנגנון חם. במרכז הכיפה התחתונה עמד הגוף על ראש האגס, ושם החום היה קיצוני: הוא התיך את שכבת הסיאל וסילק אותה. ייתכן שהניתוק האחרון שם לא היה נקי, אבל החום והכבידה של הגוף החליקו את כל האזור. היכן שהקרום של הצד הקרוב הוא הדק ביותר, הוא פתוח: הימות הם הפתחים של B.5§, והקרום שמתחתם דק כי הם פתחים.

והשחרור עצמו. כשמרכז המסה של הירח מגיע לקו הקורוטציה, הגוף מתחיל להיפרד; כוחות הקורוטציה מושכים אותו החוצה בכוח, ואחרון המגע, שמתנגד רק מעט, נכנע כ-210 ק"מ מעבר לקו (C.5, C.5a, C.8§). הגוף עוזב אז עם הסיאל שלו: הקליפה שמעל הכיפה, הסיאל המקולף שמעל הטבעת, ומעל המגע פני שטח שכבר הוחלקו בחום.

כך הגוף נפרד בשתי דרכים בבת אחת: קילוף איטי על פני הטבעת, שבו הסיאל הולך איתו, ומשיכה על פני הדסקה המרכזית, שבה המגע החם מתנגד רק מעט. את השני מעריכים עכשיו.

C.5 כיצד הגוף משתחרר מעבר לקו הקורוטציה

מאמר 2 ממקם את השחרור במקום שבו מרכז המסה של הירח מגיע לקו הקורוטציה: מעבר לו כוחות הקורוטציה מושכים את הגוף החוצה. הירח מתחיל להיפרד כשמרכז המסה שלו מגיע לקו, ומשתחרר כ-210 ק"מ מעבר לו, כשמעט יותר ממחציתו חצתה את הקו (C.5a§). המגע שבין האגס לגוף מתנגד רק מעט; הגוף נמשך החוצה בכוח, והמשיכה הזאת משכה את רכסי השפכטל. סעיף זה מעריך כמה המגע התנגד.

מדוע מרכז המסה, ומדוע הקו. גוף שנע כיחידה אחת מגיב לסכום הכוחות הפועלים עליו, והסכום הזה פועל כאילו כל המסה שלו נמצאת במרכז המסה. בתוך קו הקורוטציה משיכת כדור הארץ על הגוף גדולה ממה שהתנועה המעגלית שלו צריכה, ולכן הגוף כולו נלחץ לעבר כדור הארץ והמגע נמצא בדחיסה: הוא נדחף, לא נמשך, והוא מחזיק. הצד הרחוק של הגוף מגיע לקו ראשון (טבלת הקצה ב-C.7§), אבל כל עוד המרכז נמצא בפנים, החלקים שבתוך הקו גוברים על החלקים שמעבר לו והגוף עדיין נלחץ פנימה. כשהמרכז חוצה את הקו, הסכום מתהפך: ההשלכה החוצה עולה על המשיכה, והגוף מתחיל למשוך את המגע. מכאן והלאה המגע נמצא במתיחה, והשאלה הופכת לשאלה כיצד שכבה חמה וצמיגה מתנהגת כשמושכים אותה.

מה פירוש שחרור Stefan. שני לוחות זכוכית שטוחים עם שכבה דקה של מים ביניהם קל להחליק זה על זה, אבל קשה למשוך זה מזה בקו ישר. כדי לפתוח את הרווח, הנוזל צריך לזרום פנימה מן השוליים לעבר המרכז,

וככל שהרווח דק יותר, הוא זורם בקושי רב יותר. כשמושכים אותם לאט, הלוחות נפרדים לאט בהתחלה; כשהרווח התרחב מעט, הנזול זורם פנימה בקלות והם נפרדים בבת אחת. ההתנגדות אינה חוזק שנשבר; היא התנגדות לקצב הפתיחה, שנקבעת על ידי צמיגות השכבה — התנגדותה לזרימה — על ידי גודל הלוחות ועל ידי רוחב הרווח. זו הבעיה של Stefan, והמגע הוא שכבה כזו בקנה מידה גדול מאוד.

נתאר את המגע בשלב 3 כשכבה ניוטונית בעובי d_0 , ברדיוס $R_c = 1500$ km (הדסקה בת 3,000 הק"מ של B.4§) ובצמיגות η_c . שכבה ניוטונית היא שכבה שהתנגדותה לזרימה יחסית למהירות שבה גורמים לה לזרום, כמו מים או דבש. שכבה כזו אינה נושאת מתיחה; היא מתנגדת לקצב שבו שני הגופים נפרדים. לשתי דסקות הנפרדות בקצב $\dot{d}$, ההתנגדות היא זו של Stefan:

$$F = \frac{3\pi\eta_c R_c^4 \dot{d}}{2d^3},$$

כאן d הוא הרווח ברגע נתון ו- $\dot{d}$ הקצב שבו הוא נפתח. המשוואה אומרת שלושה דברים. ההתנגדות גדלה עם d^{-3} (30) הצמיגות ועם מהירות הפתיחה: משיכה איטית פוגשת התנגדות קטנה. היא גדלה בתלילות רבה עם גודל הדסקה, כ- R_c^4 : דסקה רחבה פי שניים מתנגדת פי שישה-עשר. והיא יורדת בתלילות רבה כשהרווח נפתח, כ- d^{-3} : רווח רחב פי שניים מתנגד פי שמונה פחות.

הכוח שמניע את ההפרדות, לאחר שמרכז המסה של הגוף עבר את רדיוס הקורטציה במרחק Δr , הוא הכוח נטו החוצה במערכת המסתובבת, $F_{\text{net}} = m (3\omega^2) \Delta r$, כאשר $3\omega^2 = 2.7 \times 10^{-7} \text{ s}^{-2}$ ביממה של 5.77 שעות ברגע השחרור (מאמר 2). הגורם $3\omega^2$ מבטא באיזו מהירות התאוצה נטו החוצה גדלה עם המרחק מעבר לקו: ההשלכה החוצה $\omega^2 r$ גדלה כלפי חוץ בעוד המשיכה K/r^2 יורדת, ובקו שתיהן יחד משתנות ב- $3\omega^2$ לכל מטר של מרחק. בקו הכוח המניע הוא אפס; צעד קטן מעבר לו נותן כוח קטן החוצה, וצעד גדול יותר כוח גדול יותר. אם כל ההתארכות נלקחת לתוך השכבה, $\Delta r = d - d_0$:

$$\dot{d} = \frac{2m \cdot 3\omega^2 (d - d_0) d^3}{3\pi\eta_c R_c^4}.$$

משוואה (31) משווה את הכוח המניע להתנגדות ופותרת עבור קצב הפתיחה. היא מכילה את שני האפקטים (31) שמאצים את השחרור: הכוח המניע גדל עם $d - d_0$, וההתנגדות יורדת עם d^3 .

הפתרון בורח: ההתנגדות יורדת כ- d^{-3} ככל שהרווח נפתח, ולכן ההתנגדות הקטנה של המגע נכנעת מהר; השחרור מוגדר כאן כהגעת הרווח ל- $d = 3d_0$, שבו ההתנגדות ירדה פי 27 והפתרון בורח. המרווח ברגע השחרור נקבע על ידי עובי השכבה בלבד, $\Delta r_{\text{release}} = d - d_0 \simeq 2d_0$ (גרסה קודמת נתנה 1) d_0 (2); הצמיגות ורדיוס המגע קובעים רק את הזמן. הסיבה היא שהרווח צריך להיפתח בכפולה קבועה של העובי ההתחלתי לפני שההתנגדות קורסת, תהא הצמיגות אשר תהא; שכבה קשיחה יותר רק גורמת לאותה פתיחה להימשך זמן רב יותר. הטבלה נותנת ארבעה מקרים; עמודת הזמן משתנה עם הצמיגות ועם העובי, ועמודת המרווח רק עם העובי:

η_c [Pa s]	d_0 [ק"מ]	R_c [ק"מ]	הזמן עד $d = 3d_0$	$\Delta r_{\text{release}}$
10^{13}	20	1,500	כ-250 שנה	כ-40 ק"מ
10^{15}	20	1,500	כ-25,300 שנה	כ-40 ק"מ
10^{15}	50	1,500	כ-1,620 שנה	כ-100 ק"מ
10^{17}	20	1,500	כ- 2.5×10^6 שנה	כ-40 ק"מ

השחרור הצמיג של המגע: הזמן עד שהרווח מגיע ל- $3d_0$ והמרווח מעבר לקו הקורטציה ברגע השחרור, בארבעה מקרים.

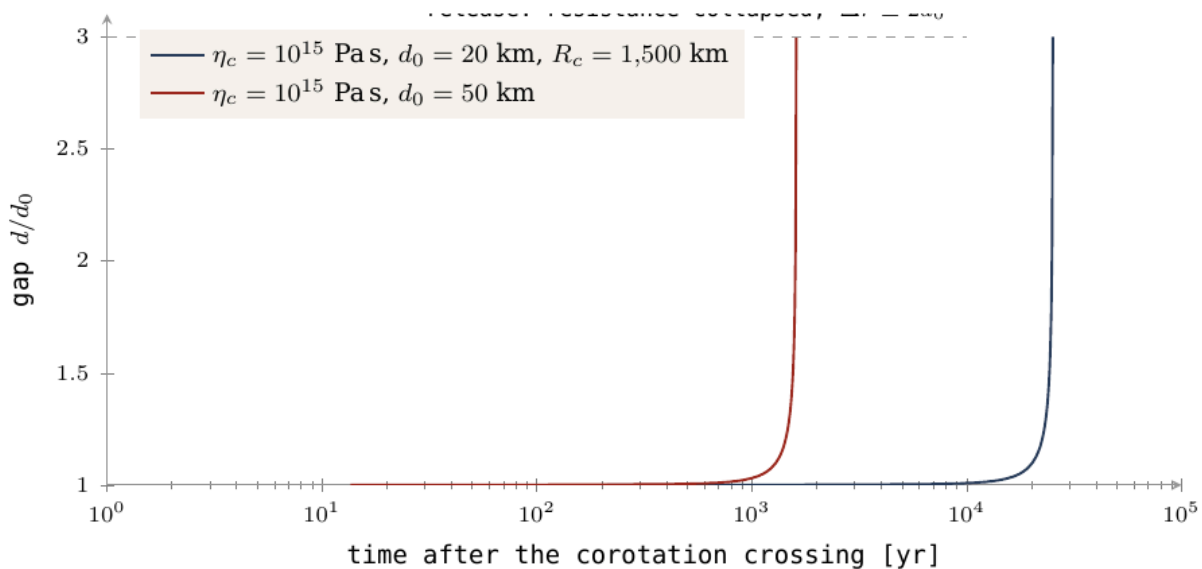
הזמנים מתקבלים מאינטגרציה של משוואה (31) מרווח הזרע $(1 + 10^{-3}) d_0$ ועד רווח השחרור $3d_0$, עם מסת הירח; הם משתנים כ- η_c/d_0^3 . גרסה קודמת של הטבלה נתנה כ-4,800, 320 ו- 5×10^5 שנה לשלוש השורות האחרונות; הערכים האלה לא נבעו ממשוואה (31), שנותנת את הזמנים המוצגים כעת ומתאימה לעקומות של איור 11. גרסה מאוחרת יותר נתנה כ-240, 25,700, 1,640 ו- 2.6×10^6 שנה; הזמנים המוצגים כעת הם האינטגרל עצמו, וארבע השורות מתייחסות זו לזו כ- η_c/d_0^3 . עמודת המרווח לא השתנתה.

שכבת מגע בעובי 20–50 ק"מ נותנת 40–100 ק"מ, והשחרור שאומץ, כ-210 ק"מ (C.5a§), מתאים לשכבה בעובי של כ-105 ק"מ — בכל המקרים מרווח קטן לעומת מרחק שחרור של 16,400–17,300 ק"מ, פחות מאחוז וחצי ממנו. לכן הגוף עוזב למעשה על הקו, כפי שמאמר 2 דורש, והמסלול שהוא נכנס אליו נקבע על ידי הקו ולא על ידי פרטי השכבה. בתיאור של C.7–C.8§ זו הפתיחה האחרונה של המגע, לאחר שמרכז הירח הגיע לקו וכוחות הקורוציה והלחץ הפנימי פועלים יחד. השחרור בקו מתבצע אפוא על ידי החיבור שהמאמר הזה מוצא, בלי צוואר צר ובלי הנחה חדשה; המגע, חם ורך (A.5, §B.4), מתנגד רק מעט, ובשכבה בעובי של כ-105 ק"מ הגוף משתחרר כ-210 ק"מ מעבר לקו (גרסה קודמת לקחה שכבה בעובי 50 ק"מ ושחרור כ-100 ק"מ מעבר לקו).

הזמנים בטבלה, מכמה מאות שנים ועד כמה מיליוני שנים (גרסה קודמת אמרה "עד כמה מאות אלפי שנים"), קצרים לעומת משך הבנייה. הם מעריכים את ההתנגדות הקטנה של המגע; הגוף עצמו נמשך החוצה בכוח, והמשיכה הזאת משכה את רכסי השפכטל.

הצימוד הסיבובי. שאלה שנייה היא אם אותו מגע יכול להמשיך לסובב את הגוף עם כדור הארץ בזמן שהוא עולה. כשהגוף נע החוצה, יש לתת לו מהירות צדדית רבה יותר כדי שיעמוד בקצב הסיבוב, ולשם כך דרוש מומנט כוח — כוח מסובב. אותה שכבה עונה על שאלת הצימוד הסיבובי: מומנט הכוח הדרוש כדי להשאיר את הגוף בקורוציה כשהוא עולה ק"מ אחד בשנה הוא $N \text{ m } 2m\omega_{\text{irr}} \simeq 2 \times 10^{22}$; הכוח הצדדי שהוא מחייב בגוף, $N 2m\omega_{\text{irr}} \simeq 1.4 \times 10^{15}$, כשהוא מתפזר על פני המגע הוא מאמץ גזירה של כ-0.2 קילו-פסקל (גרסה קודמת נתנה 7 קילו-פסקל) — זניח לכל צמיגות שבטבלה. חמישית קילו-פסקל היא בערך חלק חמש-מאות מלחץ האוויר בגובה פני הים; שכבה בכל אחת מן הצמיגויות שלמעלה נושאת אותו בקצב גזירה זניח. המגע הרחב שומר על הצימוד הסיבובי: הוא מחזיק את הגוף לצדדים בזמן שהוא עולה, ולאורך הרדיוס הוא מתנגד רק מעט לאחר שהמרכז עבר את הקו.

איור 11 מראה את פתיחת הרווח בזמן לשניים מן המקרים. שתי העקומות נשארות כמעט שטוחות במשך רוב הזמן ואחר כך עולות בחדות: ההתנגדות נכנעת כשהרווח נפתח מעט. השכבה העבה יותר משתחררת מוקדם יותר, אבל בשני המקרים הרווח ברגע השחרור נפתח לפי שלושה מן העובי ההתחלתי, ולכן המרווח מעבר לקו, $d - d_0$, הוא פי שניים מעובי השכבה — 40 ק"מ לשכבה של 20 ק"מ ו-100 ק"מ לשכבה של 50 ק"מ, כמו בטבלה (גרסה קודמת של משפט זה קראה למרווח פי שלושה מן העובי).



איור 11. פתיחת רווח המגע לאחר שמרכז הגוף חוצה את רדיוס הקורוטציה, משוואה (31); ההיסטוריות מתחילות ב- $d(0) = d_0 (1 + 10^{-3})$, כשהרווח ההתחלתי הוא עובי השכבה עצמו עם זרע של $10^{-3} d_0$. ההתנגדות של Stefan של המגע קטנה, והיא נכנעת כשהיא יורדת כ- d^{-3} ; המרווח מעבר לקורוטציה ברגע השחרור הוא בערך פי שניים מן העובי ההתחלתי של השכבה, תהא הצמיגות אשר תהא — היא קובעת רק את הזמן. (בגרף: ציר אופקי — הזמן מאז חציית הקורוטציה, בשנים; ציר אנכי — הרווח d/d_0 ; כחול: $d_0 = 20$ ק"מ, $R_c = 1500$ ק"מ; אדום: $d_0 = 50$ ק"מ; $\eta_c = 10^{15}$ Pa s, הקו המקווקו: שחרור, ההתנגדות קרסה, $\Delta r \simeq 2d_0$).

הסדר קבוע: הגוף התעגל החוצה ונפחס בשלב המחובר, וההתעגלות פנימה שלו הושלמה לפני השחרור — יחס הצירים של 1.2 שייך לשלב המחובר המאוחר, וברגע השחרור הגוף היה עגול וקליפתו קשיחה (מאמר 7; מאמר 2, §7.B). הניתוק הוא מתיחה של השכבה, לא צביטה, והגוף שהיא משחררת נושא קליפה.

מדוע הגוף לא החליק אל המשווה. גוף המונח על גוף אם שמסתובב פעם אחת ב-5.5 שעות חש כוח צנטריפוגלי — ההשלכה החוצה של הסיבוב. במשווה הכוח הזה רדיאלי כולו; בקו רוחב φ יש לו רכיב משיקי, $\omega^2 r \sin \varphi \cos \varphi$, המכוון אל המשווה. זה אותו רכיב כמו a_λ של משוואה (19), מן הצד השני: שם הוא מה שהחיבור צריך לספק, כאן הוא מה שהיה מזיז את הגוף אילו דבר לא סיפק אותו. על גוף אם נזלי, גוף ב- 22.5° היה מחליק אל המשווה ונפרד משם, בנטייה אפס. מה מנע זאת?

על הקצה הרחב — עיגון. הגוף נשען על בסיס ברוחב 6,000 ק"מ, בתוך פתח בקליפה הסיאלית הקשיחה. זו הקליפה שהמודל דורש בכל מקרה, בצמיגות של 10^{23} Pa s או יותר, כדי שתיעוד המכתשים ישרוד עליה (§6.B). קליפה שמחזיקה מכתשים מחזיקה מיקום: בסיס המעוגן על פני שטח כזה אינו נודד. קליפה קשיחה מספיק כדי שמכתש של 100 ק"מ לא יירגע בעשרה מיליון שנים (§3.B) קשיחה הרבה יותר מכדי לאפשר לבסיס ברוחב 6,000 ק"מ להחליק עליה.

בהתעגלות החוצה — האגס. המגע מצטמצם ל-3,000 ק"מ, אבל הגוף עדיין נשען על קצה האגס, חלק מכדור הארץ שמוחזק בכבידה של כדור הארץ, ונושא את העומס הצדדי למטה אל כדור הארץ (§7.C.4). הגוף אינו נסחף לעבר המשווה.

מסקנה. הגוף משתחרר בקו הרוחב שבו נישא, קו רוחב השחרור של מאמר 4, 22.5° . הנטייה היא ההטיה של מסלול הירח ביחס למשווה של כדור הארץ; גוף שמשתחרר בקו רוחב מסוים מתחיל במסלול הנטוי בזווית של אותו קו רוחב. בסיס האגס עמד בערך על המשווה של אותה תקופה; האם המשווה ההוא הוא המשווה של היום — זה נושא הצירים, שהוא עבודה עתידית.

C.5a כמה רחוק מעבר לקו: מרחק השחרור

סעיף C.5 מצא שהגוף משתחרר במרחק קצר מעבר לקו הקורטוציה. הסעיף הזה שואל כמה רחוק, מה המרחק הזה עושה למסלול, ובאיזה טווח החוקים המצומצמים של הסדרה ממקמים אותו. התשובה היא השחרור שהסדרה מאמצת: כ-210 ק"מ מעבר לקו, כשמעט יותר ממחצית הירח חצתה אותו. השאלה חשובה כי המרחק קטן לעומת הרדיוס — פחות מאחוז וחצי ממנו — אבל אינו קטן עבור צורת המסלול. גוף שמשתחרר בדיוק על הקו נע במהירות של מסלול מעגלי ונכנס למעגל. גוף שמשתחרר מעבר לקו נושא מעט יותר מהירות ממה שמעגל דורש: נקודת השחרור הופכת לנקודה הקרובה ביותר של המסלול, הפריגאה, והמסלול הוא אליפסה מתוחה מעט. האקסצנטריות שלה, e_0 — אפס למעגל, וגדלה ככל שהאליפסה נמתחת — גדלה עם המרחק מעבר לקו. האקסצנטריות הזו, והמסלול הגדול במקצת שבא איתה, נישאים אל שני המספרים שאפשר לבדוק מולם את הירח של היום: הנטייה של מסלולו והמתיחה של מסלולו.

המסגרת. כל שורה מציבה את מרכז המסה של הירח במרחק הנתון מעבר לקו הקורטוציה ברגע הניתוק המלא, ביממת השחרור של 5.77 שעות וברדיוס הגוף בשחרור, 1,890 ק"מ; "חצה" הוא החלק מנפח הירח שנמצא מעבר לקו באותו רגע. המסלול ההתחלתי נובע מן הנוסחאות של מאמר 4, נספח A (יחס המהירויות B , $a_0 = r_0 / (2 - B)$, $e_0 = |1 - B|$, נקודת השחרור בפריגאה), והזווית הסופית מחוק הטנגנס המצומצם של מאמר 4, חלק D, $\tan i = \tan \lambda (a_0 / 384\,400 \text{ km})^{1/2}$. האקסצנטריות נישאת מן השחרור עד המרחק של היום, 384,400 ק"מ, בגאות של פיגור זמן קבוע [21] — הגאות שמורמת בכדור הארץ ועוד הגאות שמורמת בירח סינכרוני, שעוצמתה ביחס לזו של כדור הארץ היא A — כשסיבוב כדור הארץ נובע משימור התנע הזוויתי; השמש ותהודת האבקציה אינן כלולות.

הנטייה. הטבלה הראשונה משחררת את הגוף בקו הרחוב של הסדרה, 22.5° , שבו קו הקורטוציה נמצא ב-17,287 ק"מ. קראו אותה מלמעלה למטה: המרחק גדל, ואיתו החלק מן הגוף שחצה את הקו, האקסצנטריות בשחרור, גודל המסלול והזווית הסופית במרחק של היום. הגוון הכחול-כהה מעמיק עם הזווית הסופית. השורה בירוק ובהדגשה היא זו שהזווית הסופית שלה שווה ל- 5.145° הנצפים; זהו השחרור שאומץ.

המרחק (ק"מ)	חצה	a_0 (ק"מ)	e_0	אפוגאה (ק"מ)	הזווית הסופית
0	50%	17,287	0	17,287	5.020°
50	52%	17,489	0.009	17,641	5.049°
100	54%	17,696	0.017	18,005	5.079°
150	56%	17,907	0.026	18,377	5.109°
כ-210 (שאומץ)	58%	18,163	0.037	18,831	5.145° (נצפה)
300	62%	18,571	0.053	19,554	5.202°
400	66%	19,040	0.071	20,392	5.267°
500	69%	19,531	0.089	21,275	5.334°
650	75%	20,316	0.117	22,695	5.440°
1,000	86%	22,404	0.184	26,521	5.711°

טבלה C.5a.1. שחרור ב- 22.5° (קו הקורטוציה ב-17,287 ק"מ): המסלול ההתחלתי והזווית הסופית לפי החוק המצומצם, כפונקציה של המרחק מעבר לקו. הכחול-כהה מעמיק עם הזווית הסופית; הירוק מסמן את 5.145° הנצפים, שהם השחרור שאומץ.

הזווית הסופית עולה לאט ובהתמדה עם המרחק: כשלוש מאיות מעלה לכל 50 ק"מ. שחרור על הקו נותן 5.020° , שחרור 100 ק"מ מעבר לו 5.079° , ו- 5.145° הנצפים מתקבלים בכ-210 ק"מ, כש-58% מנפח הירח חצו את הקו.

אולם הזווית רגישה יותר לקו הרוחב של הקצה מאשר למרחק. המחבר ממקם את הקצה בין 22° ל- 24° ; המרחק שמחזיר 5.145° נע לאורך הטווח הזה כך:

קו הרוחב של הקצה	המרחק שמחזיר 5.145°
22° כ-420 ק"מ	
22.5° כ-210 ק"מ	
23° כ-0 ק"מ — על הקו	
24° אין: הזווית עולה על 5.145° כבר על הקו	

טבלה C.5a.2. הרגישות לקו הרוחב של הקצה. הכחול-כהה מעמיק עם קו הרוחב; הירוק מסמן את קו הרוחב של הסדרה.

חצי מעלה של קו רוחב מזיזה את המרחק בכ-200 ק"מ. הנטייה לבדה ממקמת אפוא את השחרור בתוך טווח, לא בנקודה; המבחן השני מצמצם אותו.

המתיחה. הטבלה השנייה עורכת את אותו חיפוש עבור האקסצנטריות. היא נעשית במישור, בשחרור על המשווה של אותו זמן (קו הקורטציה ב-16,399 ק"מ), שבו נכתבות משוואות הגאות שלמעלה; במרחק נתון האקסצנטריות בשחרור כמעט זהה לזו שב- 22.5° (השוו בין שתי הטבלאות). שלוש העמודות האחרונות נותנות את האקסצנטריות במרחק של היום לשלושה ערכים של A . המספר A אומר עד כמה חזק בלע הירח הצעיר אנרגיה גאותית ביחס לכדור הארץ: לירח קר וקשיח A קטן, לירח חם ורך A גדול. הגאות בכדור הארץ מותחת את המסלול בזמן שהוא גדל; הגאות בירח מעגלת אותו. הגוון הכחול-כהה מעמיק עם e_0 ; התא הירוק הוא הקרוב ביותר לערך של היום, 0.0549.

המרחק (ק"מ)	חצה	e_0	פריגאה (ק"מ)	אפוגאה (ק"מ)	e היום, $A = 0$	$A = 1$	$A = 3$
0	50%	0	16,399	16,399	0	0	0
100	54%	0.018	16,499	17,117	0.76	0.49	0.013
200	58%	0.037	16,599	17,875	0.82	0.63	0.048
300	62%	0.056	16,699	18,676	0.85	0.70	0.11
500	69%	0.094	16,899	20,417	0.88	0.78	0.30

טבלה C.5a.3. שחרור על המשווה של אותו זמן (קו הקורטציה ב-16,399 ק"מ): המסלול ההתחלתי והאקסצנטריות במרחק של היום לשלוש עוצמות A של הגאות בירח. הכחול-כהה מעמיק עם e_0 ; הירוק מסמן את הערך הקרוב ביותר ל-0.0549 של היום.

השורה הראשונה היא המכרעת. גוף שמשתחרר בדיוק על הקו נכנס למעגל, והגאות נושאת מעגל החוצה כמעגל: יהא ערכו של A אשר יהא, האקסצנטריות נשארת אפס לכל אורך הדרך עד 384,400 ק"מ. כל אקסצנטריות שיש לירח היום חייבת אפוא להתחיל כ- e_0 קטן ברגע השחרור. כשהפיזור בירח קטן ($A = 0$ או 1), הגאות בכדור הארץ מותחת גם e_0 קטן לאלופסה ארוכה; בירח צעיר וחם הגאות בירח מרסנת את המתיחה, ול- $A = 3$ הערך של היום, 0.0549, נמצא בין השורה של 200 ק"מ לשורה של 300 ק"מ. המרחק שמחזיר את האקסצנטריות של היום תלוי ב- A : כ-120 ק"מ ל- $A = 2.5$, כ-210 ק"מ ל- $A = 3.0$, כ-330 ק"מ ל- $A = 3.5$ וכ-460 ק"מ ל- $A = 4.0$.

תוצאה

1. שחרור בדיוק על הקו נותן מסלול מעגלי, שהגאות אינה יכולה להפוך לאקסצנטרי. שחרור מעט אחרי שמרכז המסה חוצה את הקו הוא אפוא דרוש, ולא רק מותר.

2. שני מבחנים מצומצמים בלתי תלויים — הנטייה של היום (טבלה C.5a.1, ב- 22.5°) והאקסצנטריות של היום (טבלה C.5a.3, עם ירח צעיר וחם, $A \approx 3$) — נפגשים סמוך לאותו מרחק, כ-210–200 ק"מ מעבר לקו, כשמעט יותר ממחצית הירח (כ-58%) חצתה אותו. זהו "מעט אחרי מרכז המסה", כפי שהמודל גורס, וזהו השחרור שהסדרה מאמצת. הטבלאות מראות את הטווח שבו החוקים המצומצמים ממקמים אותו.
3. אף אחת מן הטבלאות אינה מכריעה לבדה: הזווית תלויה בקו הרוחב של הקצה, האקסצנטריות בפיזור בירח. האינטגרציה המצומדת המלאה ממצב השחרור (מאמר 4, עבודה נוספת) מכריעה.

במונחים של C.5§, שבהם המרווח בשחרור הוא $\Delta r \simeq 2d_0$, המרחק שאומץ, כ-210 ק"מ, מתאים לשכבת מגע בעובי של כ-105 ק"מ, פי שניים מן השכבה של 50 ק"מ בשורה שלפני האחרונה בטבלה של C.5§; ההתנגדות נשאת ההתנגדות הקטנה של מגע חם ורך, והמרחק נשאר פחות מאחוז וחצי ממרחק השחרור.

מאחורי הקלעים. גרסה קודמת של המאמר אימצה שחרור כ-100 ק"מ מעבר לקו, ההערכה של המחבר לשכבת מגע בעובי של כ-50 ק"מ. חיפוש מרחק השחרור שלמעלה הראה ששני המבחנים המצומצמים נפגשים מעט רחוק יותר, והסדרה מאמצת כעת את הערך המחושב; ההערכה הייתה בתוך אותו טווח וקרובה אליו.

מה שיש בידינו עכשיו: העומס ברגע השחרור ידוע (C.2§), הוא נישא על ידי מגע רחב וחם ולא על ידי צוואר (C.4§), והגוף מתחיל להיפרד בקו ומשתחרר כ-210 ק"מ מעבר לו, נמשך החוצה בכוח כנגד מגע שמתנגד רק מעט (C.5§); הנטייה והמתיחה של המסלול של היום נפגשות סמוך למרחק הזה לפי החוקים המצומצמים (C.5a§). הסעיף הבא מנסח את התוצאה הזו בצורה שמאמר 4 צריך.

C.6 תנאי ההעברה למאמר המסלול

מסלול הירח אחרי השחרור הוא הנושא של מאמר 4 (המסלול). הוא צריך מן המאמר הזה רק את המצב ברגע השחרור: היכן היה הירח, באיזו מהירות הסתובב כדור הארץ, ומה החיבור עוד עשה. המצב שמועבר למאמר 4 הוא זה של מאמר 2, כשהקיצוץ בין האגס המתארך לליבה המתרכזת נלקח בחשבון. האגס המתארך נושא מסה החוצה ולכן מאט את סיבוב כדור הארץ; הברזל השוקע לעבר המרכז — הליבה המתרכזת — מאיץ אותו, כפי שמחליקה מסתובבת מהר יותר כשהיא מקרבת את זרועותיה; שניהם יחד נותנים את היממה של 5.77 שעות (מאמר 2, A.4§):

קו רוחב השחרור	יממת כדור הארץ	מרכז הירח ברגע השחרור	המסלול ברגע השחרור	עומס החיבור
0° (משווה)	שעות 5.77	כ-16,610 ק"מ (הקו ב-16,399 ק"מ)	כמעט מעגלי, $e_0 \simeq 0.04$	האיזון הרדיאלי מתקיים; רק ההתנגדות הקטנה של המגע
22.5° (מאמר 4)	שעות 5.77	17,496 ק"מ (הקו ב-17,287 ק"מ)	כמעט מעגלי, $e_0 \simeq 0.037$	4.06×10^{22} ניוטון, צדדי

תנאי ההעברה למאמר 4: מצב השחרור במשווה ובקו הרוחב שאומץ, 22.5° .

שתי השורות נבדלות רק בקו הרוחב. במשווה הקו נמצא ב-16,399 ק"מ, ולחיבור לא נשאר ברגע השחרור עומס מלבד ההתנגדות הקטנה של המגע; ב- 22.5° הקו רחוק יותר, ב-17,287 ק"מ, והעומס הצדדי של C.2§ נשאר. בשני המקרים הירח עוזב במסלול כמעט מעגלי: על הקו המהירות שהוא נושא עם הסיבוב היא המהירות של

מסלול מעגלי, וכ-210 ק"מ מעבר לו מעט יותר, ולכן נקודת השחרור היא הפריגאה (§C.8, C.5a). (גרסה קודמת העבירה שחרור על הקו, במסלול מעגלי).

מאחורי הקלעים. גרסה קודמת של סעיף זה העבירה שחרור מאוחר יותר, ב-20,595 ק"מ וביממה של 6.59 שעות, מעבר לגבול רוש הנוזלי של גוף בצפיפות 2,600 ק"ג/מ"ק. הענף ההוא לקח בחשבון רק את האגס המתארך; עם הליבה המתרכזת היממה ברגע השחרור היא 5.77 שעות והקו נמצא בכ-16,400 ק"מ (מאמר 2, §A.4). הגוף המשתחרר שם נמצא בתוך גבול רוש הנוזלי והרחק מחוץ לגבול הקשיח (10,314 ק"מ ב-2,600 ק"ג/מ"ק): הוא מוחזק על ידי קליפתו הקשיחה והמעוגלת, לא על ידי שיווי משקל נוזלי (מאמר 7, §C.5). גבול רוש הוא המרחק מכדור הארץ שבתוכו המתיחה הגאותית עולה על הכבידה העצמית של גוף: גוף נוזלי בתוכו נקרע, ואילו גוף בעל קליפה קשיחה שורד קרוב הרבה יותר, עד הגבול הקשיח. הירח ברגע השחרור נמצא בין השניים, ולכן הקליפה הקשיחה חשובה.

7.c בליטה אחת: כדור הארץ נמשך לאגס שקצהו הופך לירח

סעיף זה מתאר את המבנה שנושא את הגוף מלמטה: מהו, מדוע צורתו צורת אגס, מה רוחבו ואורכו, וכמה מסה הוא מכיל.

ברגע השחרור מרכז הגוף נמצא על קו הקורוטציה, כ-16,400 ק"מ ממרכז כדור הארץ במשווה, ופני השטח הקרובים שלו בכ-14,500 ק"מ — המרכז פחות רדיוס הגוף, 1,890 ק"מ. בין פני השטח של כדור הארץ — 6,701 ק"מ מן המרכז במשווה של גוף האם הפחוס ביממה של 5.77 שעות — לבין פני השטח האלה מפרידים כ-7,800 ק"מ. משהו מחובר צריך למלא אותם, כי גוף שהיה עוזב את פני השטח של כדור הארץ עם הסיבוב לבדו היה נושא פחות ממחצית המהירות של מסלול ונופל בחזרה (§C.8). אנו מציעים שכדור הארץ עצמו ממלא אותם, בבליטה אחת: הלחץ שהרים את הגבעה המשיך להרים אותה, והבליטה נמשכה לאגס מן החומר של כדור הארץ עצמו, שקצהו — הכיפה של חלק B — התעגל והפך לירח. הסיבוב, ההתמיינות של פנים כדור הארץ והלחץ הפנימי, שמושכים את האגס החוצה, פועלים כמנגנון אחד; שלושת פניו מתוארים להלן, תחת האגס לפני המאמר הזה.

מדוע חוט אינו יכול, ואגס יכול. חוט נוזלי בין שני גופים אינו יכול לשאת את הגוף: הכבידה המשותפת של כדור הארץ והגוף אכן מושכת חומר שזו ממקומו בחזרה אל הקו שביניהם — לכל כיוון ובכל גובה — אבל בחוט ברוחב 3,000–4,200 ק"מ המשיכה המחזירה הזו מחזיקה רק עשירית עד חלק חמישים מן הלחץ הנדרש ליד בסיסו, 35–81 ג"גה-פסקל. האגס אינו חוט. הוא חלק רחב של כדור הארץ עצמו, והוא מוחזק בכבידה של כדור הארץ כמו כל חלק אחר של כדור הארץ, כפי שכדור הארץ מחזיק את הירח. הוא אינו נזרק, משום שמהירותו אינה מהירות זריקה והוא נמצא כולו בתוך קו הקורוטציה. ליד כדור הארץ הוא רחב, והוא מצטר בקשת אחת לעבר קצהו, שנושא את המגע בכ-15,400 ק"מ מן המרכז — מרכז הירח ב-17,287 ק"מ פחות רדיוסו, 1,890 ק"מ (גרסה קודמת נתנה 16,100 ק"מ ו-9,500 ק"מ לראש הקצה). האגס בהתחלה, כשהגוף יושב על הקצה הרחב (§B.2), וברגע השחרור:

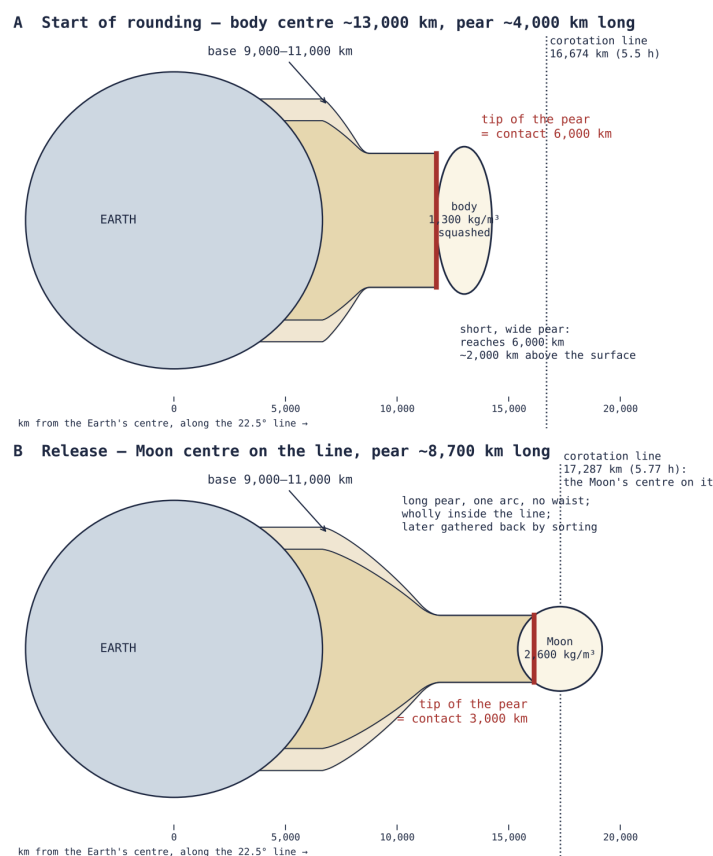
התחלה: מרכז הגוף בכ-13,000 ק"מ, 5.5 שעות		שחרור: מרכז הירח ב-17,287 ק"מ, 5.77 שעות
קצה האגס (המגע)	ק"מ 6,000	ק"מ 3,000
האורך, מפני השטח של כדור הארץ עד המגע	כ-4,000 ק"מ	כ-8,700 ק"מ

האגס בשני רגעים: בתחילת הדרך וברגע השחרור.

שתי העמודות מתארות את האגס הגדל. בין ההתחלה לשחרור אורכו בערך הוכפל, מכ-4,000 ל-8,700 ק"מ, וקצהו הצטמצם בחצי, מ-6,000 ל-3,000 ק"מ, כשהגוף שעליו התעגל החוצה.

רוחב הבסיס. בסיס האגס נלקח ברוחב 9,000–11,000 ק"מ. חסם עליון מגיע מן האנרגיה: בסיס רחב יותר מכיל יותר מסה, והרמת מסה רבה יותר עולה יותר עבודה. כשמרחיבים את הבסיס באותה צורה, האגס ברגע השחרור מכיל 8.8 מסות ירחיות בבסיס של 9,000 ק"מ, 10.4 ב-10,000 ק"מ ו-12.1 ב-11,000 ק"מ, והרמתו עולה 8.1×10^{30} , 9.3×10^{30} ו- 1.05×10^{31} ג'אול — האחרון מסדר הגודל של האנרגיה שמשתחררת בהיווצרות ליבת כדור הארץ. אנו לוקחים את הבסיס כ-9,000–11,000 ק"מ. בזמן שהגוף עלה, הקצה הצטמצם מ-6,000 ל-3,000 ק"מ, ואילו הבסיס התרחב.

מסת האגס. האגס מכיל אפוא 8.8–12.1 מסות ירחיות לבסיסים של 9,000–11,000 ק"מ. הערך "כתשע מסות ירחיות" שבו משתמש המאמר הזה (C.9§) הוא המקרה של 9,000 ק"מ, הקצה הצר של הטווח; במילים, האגס מכיל כתשע עד שתיים-עשרה מסות ירחיות. לשם השוואה, האגס של 9,000 ק"מ מכיל כ-11% ממסת כדור הארץ (C.9§) — בליטה גדולה, אבל אזור אחד של כוכב הלכת, לא כוכב הלכת כולו.



To scale. Pear of material 3,000 kg/m³; light band: bases 9,000–11,000 km (upper bound: lift energy ~1e31 J, the scale of core formation). The tip narrows from 6,000 to 3,000 km while the base widens.

איור 12. האגס בשני רגעים, בקנה מידה, לאורך הקו ב-22.5°: (A) בהתחלה, הגוף יושב על קצה ברוחב 6,000 ק"מ, האגס קצר ורחב; (B) ברגע השחרור, מרכז הירח על קו הקורוטציה, האגס ארוך, בקשת אחת בלי מותן, קצהו ברוחב 3,000 ק"מ. הרצועה הבהירה משתרעת על בסיסים של 9,000–11,000 ק"מ; האגס כולו נמצא בתוך הקו.

איור 12 משרטט את שתי העמודות של הטבלה. הנקודה שיש להתבונן בה היא קו המתאר של חלופית (B): הוא מצטמצם בהדרגה מן הבסיס אל הקצה, בקשת אחת, בלי מותן שבו הוא יכול להיצבט, והוא מסתיים לפני קו הקורוטציה.

הקצה לאורך הטיפוס. קצה האגס נושא את הגוף של חלק B, והגוף מתעבה ככל שהוא עולה; הסיבוב שלו הוא של כדור הארץ. להלן השלבים, עם צורת גוף מסתובב בצפיפות וביציבות האלה (מאמר 7, C.1§). יחס הצירים

a/c הוא היחס בין הציר הארוך ביותר של הגוף לציר הקצר ביותר: 1.00 לכדור, וגדול יותר לגוף פחוס. גוף קל שמסתובב עם כדור הארץ נפחס מאוד, כי כבידתו שלו חלשה לעומת הסיבוב; כשהוא מתעבה, כבידתו גדלה והוא מתעגל פנימה. הטבלה נקראת מלמעלה למטה, כשהצפיפות עולה והיחס יורד לעבר 1:

שלב	צפיפות (ק"ג/מ"ק)	יממת כדור הארץ	יחס צירים a/c	מצב
על קצה האגס (שלב 2)	1,300	שעות 5.5	—	מוחזק על ידי הכיפה התחתונה
שיא הפחיסות, תחילת ההתעגלות פנימה, כ-13,000 ק"מ	1,300	שעות 5.5	1.69	מחזיק את עצמו; הפחוס ביותר
על האגס, עולה	1,600	שעות 5.55	1.44	מתעבה
על האגס, מתעבה	2,000	שעות 5.62	1.30	
הצד הרחוק מגיע לקו	2,300	שעות 5.70	1.24	
השלב המחובר המאוחר, מתקרב לקו	2,600	שעות 5.77	1.20	ההתעגלות פנימה מסתיימת
המרכז על הקו —	2,600	שעות 5.77	עגול, ≤ 1.04	קליפה קשיחה
היום	3,344	—	1.00	דחוס

הגוף על קצה האגס לאורך הטיפוס: הצפיפות עולה, יחס הצירים יורד לעבר 1.

הפחיסות וההתעגלות פנימה התרחשו שתיהן בזמן שהגוף היה מחובר: היחס ירד מ-1.69 בשיא הפחיסות ל-1.20 בשלב המחובר המאוחר. עד השחרור ההתעגלות פנימה הושלמה; הגוף היה עגול, קליפתו החיצונית קשיחה (מאמר 2, B.7§: יחס צירים של 1.04 לכל היותר), ומאז הוא נדחס לצפיפות של היום, 3,344 ק"ג/מ"ק.

שלוש תוצאות. שלוש תוצאות עולות. האגס הוא חלק מכדור הארץ ומוחזק בכבידה של כדור הארץ, ולכן השאלה הצדדית של החיבור נענית על ידי הכבידה של כדור הארץ עצמו: העומס הצדדי של C.2§, ששום צוואר לא יכול היה לשאת, נישא על ידי גוף רחב מן החומר של כדור הארץ עצמו. בחלקו העליון האגס נקבע על ידי המגע שהוא נושא, 6,000 ק"מ בהתחלה ו-3,000 ברגע השחרור. והאגס כולו נמצא בתוך קו הקורוטציה, כך שהכבידה האפקטיבית לאורכו מכוונת בכל מקום אל כדור הארץ: הוא דחוס לאורכו, אין לו מותן שתיצבט, ושום חלק ממנו אינו יכול להישאר במסלול; לאחר השחרור ההתמיינות אוספת אותו בשלמותו בחזרה אל כדור הארץ לאורך עשרות עד מאות מיליוני שנים.

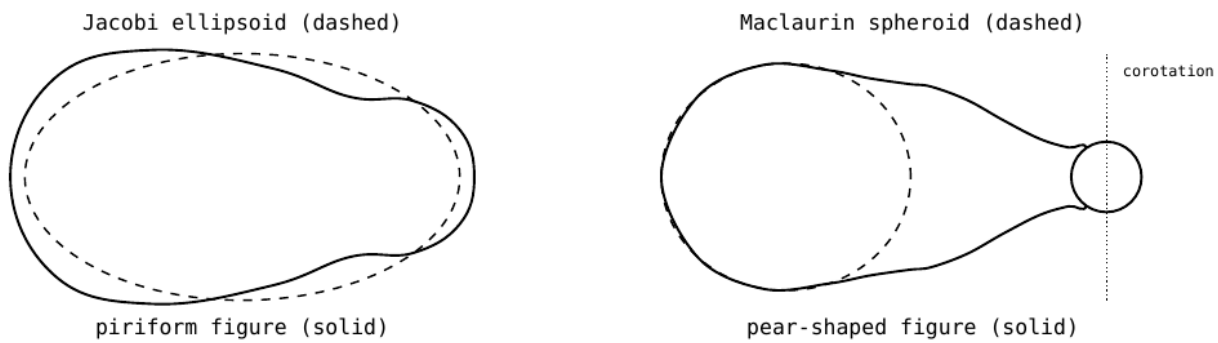
מה עלה בגורל האגס. האגס לא אבד בשחרור. לאחר השחרור ההתמיינות אספה אותו בחזרה אל כדור הארץ, בהדרגה, לאורך עשרות עד מאות מיליוני שנים. החלק הכבד שלו שקע עמוק אל תוך כדור הארץ מתחת לבסיס האגס (חלק E); הצד הקדמי שלו נאסף לפסים של צפון האוקיינוס השקט, והגב שלו לקשתות של מערב האוקיינוס השקט (מאמר 9, הפסים). המסה לא עזבה את כדור הארץ; היא עברה מגובה רב בחוץ אל עומק רב בפנים, והשאירה קמטים על פני השטח במקום שבו נכנסה.

מאחורי הקלעים. תחילה חיפשנו חוט צר בין כדור הארץ לגוף; הוא אינו יכול לשאת את העומס. אחר כך שרטטנו את האגס עם צוואר ארוך שמגיע מעבר לקו הקורוטציה, ומשתחרר כשהקצה חוצה אותו. כשהשחרור הוצב במקום שבו מרכז המסה של הירח מגיע לקו (מאמר 2), הצוואר איבד את תפקידו: האגס הוא קשת אחת מפני השטח של כדור הארץ עד המגע, כולה בתוך הקו.

האגס לפני המאמר הזה. הצורה אינה חדשה בפיזיקה. [8] Poincaré מצא ב-1885 שסדרת שיווי המשקל של נזלים מסתובבים עוברת מספרואיד Maclaurin אל אליפסואיד Jacobi ומתפצלת שם לצורה דמוית אגס, או פיריפורמית, והוא הציע שאגס עשוי להתחלק לשני גופים לא שווים. ספרואיד Maclaurin הוא הצורה הפחוסה, העגולה במבט מלמעלה, של גוף נזלי אחיד המסתובב לאט; אליפסואיד Jacobi הוא הצורה המוארכת, בעלת שלושה צירים לא שווים, שגוף כזה מקבל כשהוא מסתובב מהר יותר; והאגס מתפצל מצורת Jacobi בסיבוב מהיר עוד יותר. Darwin החיל את הרעיון על כדור הארץ והירח, ובעקבות זאת באה תאוריית הביקוע של Poincaré–Darwin [9]. בתאוריה ההיא האגס נמתח על ידי הסיבוב לבדו, ולכן הוא דורש סיבוב קרוב לנקודת ההתפרקות — זו ההתנגדות מצד התנע הזוויתי שהביאה לסופה; ו-Cartan הראה מאוחר יותר שאי-יציבות דינמית מופיעה במקום שבו האגס מתפצל מסדרת [10] Jacobi, וקוטעת את ההתפתחות האיטית שהתאוריה הניחה. האגס המוצע כאן שונה בסיבתו. הסיבה היא מנגנון אחד בעל שלושה פנים. הסיבוב יוצר לחץ צנטריפוגלי. ההתמיינות של כדור הארץ (הדיפרנציציה) נוטה לרכז את החומר הכבד, ובכך היא דוחקת את כל השאר החוצה: זה הלחץ הפנימי. והסיבוב הוא שמניע את ההתמיינות. יחד הם יוצרים את האנומליה שהיא האגס. האגס נוצר בסיבוב של 5.5 שעות שפרמטר הסיבוב שלו, $\Omega^2/\pi G\rho \simeq 0.092$, לגוף האם ההומוגני (גרסה קודמת נתנה 0.093), נמוך בהרבה מן הנקודה שבה מתחיל ענף Jacobi. פרמטר הסיבוב משווה את הסיבוב לכבידה העצמית של הגוף; את ההשוואה יש לעשות על סקלה אחת. בסקלה $\Omega^2/(\pi G\rho)$ שבה משתמשים כאן, ענף Jacobi מתחיל ב-0.374 (מאמר 2, A.6.5§), ולכן ה-0.092 של גוף האם הוא כרבע ממנו; הערך 0.187, שמצוטט לעתים קרובות לאותה נקודת הסתעפות, הוא אותה נקודה בסקלה $\Omega^2/(2\pi G\rho)$, ואין להשוות אותו ישירות ל-0.092. גוף האם של 5.5 שעות רחוק אפוא מן הסיבוב שבו הסיבוב לבדו היה הופך אותו לאגס. האגס כאן גדל מאזור אחד ולא מן הגוף כולו; רק קצהו עוזב, משמרכז המסה של הקצה מגיע לקו הקורטציה, והשאר נאסף בחזרה אל כדור הארץ בהתמיינות. שיווי משקל שאינו יציב אינו מכשול לצורה שמונעת בכוח ואחר כך משוחררת. אגס אינו יכול להיווצר בגוף שכבר מוין והסתובב לאט, כמו כדור הארץ היום: גוף כזה כבר התגבש, ושום דבר אינו יכול לצאת ממנו. בתקופת האגס הסיבוב היה מהיר, הצמיגות נמוכה וההתמיינות רק בראשיתה; בתנאים כאלה נוצרים אגסים, ומהם — ירחים.

קרוב יותר לתיאור הנוכחי, כמה מחברים הציעו שהירח עזב כדור ארץ שהסתובב לאט יותר בסיוע מבפנים. De Meijer ועמיתיו [13] הציעו פיצוץ גרעיני ליד הגבול שבין הליבה למעטפת של כדור ארץ קדום שהסתובב בכ-5.8 שעות; [14] Edwards הציע שחום וחומרים נדיפים הצטברו מעל ה-LLVP הקדומים עד שפיצוץ שיגר את החומר הזה, עם המעטפת שמעליו, למסלול נמוך, ושם הוא התלכד לירח. Lock ו-[15] Stewart הראו שכדור ארץ חם ומורחב מגיע לגבול הקורטציה שלו ויוצר מבנה מורחב מעבר לו; ו-Denton ועמיתיו [16] מצאו ש-Charon, שהיה מחובר ל-Pluto לאחר התנגשות, היה בעל מרכז מסה מעבר לרדיוס הקורטציה של Pluto לפני שהשניים נפרדו. התיאור כאן חולק מנגנון מניע עם השניים הראשונים וגבול עם השניים האחרונים, ושונה מכולם במהלכו: לא פיצוץ ולא ענן פסולת, אלא גוף מחובר אחד, שמורם בהדרגה על ידי הלחץ, וקצהו מתחיל להיפרד כשמרכז המסה שלו מגיע לקו הקורטציה ומשתחרר מעט מעבר לו.

איור 13 מציב את שני האגסים זה לצד זה. משמאל הצורה הקלאסית: הגוף כולו נמתח על ידי הסיבוב. מימין האגס של סעיף זה, משורטט בקנה מידה: כדור ארץ מסתובב בעל צורה רגילה, שמאזור אחד שלו משך הלחץ אגס, והירח בקצהו ומרכזו על הקו.



איור 13. משמאל: הצורה הפיריפורמית הקלאסית המתפצלת מאלפסואיד Jacobi, באופן סכמטי לפי [8] (Poincaré 1885); הגוף כולו נמתח על ידי הסיבוב, קרוב להתפרקות. מימין, באותו אופן: האגס של C.7§ ברגע השחרור, בקנה מידה לאורך הקו ב-22.5°: הצורה המסתובבת של כדור הארץ, ספרואיד Maclaurin ביממה של 5.77 שעות (מקווקו), שנמשכה מאזור אחד לאגס על ידי הלחץ הפנימי (קו מלא), בסיסה ברוחב 10,000 ק"מ, קצהו 3,000 ק"מ, והירח עליו ומרכזו על קו הקורוטציה (מנוקד). רק הקצה, הירח, עוזב. (בשרטוט: Jacobi ellipsoid — אלפסואיד Jacobi; piriform figure — צורה פיריפורמית; Maclaurin spheroid — ספרואיד Maclaurin; pear-shaped figure — צורת אגס; corotation — קורוטציה.)

מה דוחף את האגס החוצה: זרם, ואחר כך לחץ כלוא. האגס גדל בשני שלבים, שנקבעים על ידי הפתחים בצד הרחוק של הגוף. כל עוד הפתחים האלה פתוחים, הלחץ בורח דרכם, אבל לא בלי השפעה: הוא יוצר זרם שעובר לאורך כל המבנה, מן המקור העמוק דרך האגס והגוף, אל היציאות בצד הרחוק. הזרם הזה בונה את הצד הרחוק ואת תיעוד המכתשים שלו (מאמר 6, המכתשים), נושא חומר אל הקצה החיצוני של האגס, ושומר על החלק הצר חם. אחר כך הפתחים בצד הרחוק נאטמים. אנו מציעים ששתי סיבות פעלו יחד: הפתחים היו חשופים לקור של החלל, וככל שהאגס גדל, החלק המרוחק של הגוף התרחק ממוקד כדור הארץ ופחות חום ארצי הגיע אליו. התוצאה היא תגובת שרשרת: החום מתמעט, הימות הרחוקות נאטמות, נותרים פחות פתחי יציאה, הלחץ גובר והאגס מתארך. רוב הימות של הצד הרחוק נאטמו כך ויצרו כעין כיפה סגורה, שהלחץ דוחף אותה מבפנים. מאז הלחץ כלוא, וכשמשקל החומר העולה יורד לעבר אפס בקו הקורוטציה, האגס מאיץ החוצה. הסיבה זהה לזו שב-C.58: ליד הקו, הכבידה וההשלכה החוצה כמעט מאוזנות, ולכן החומר שם כמעט חסר משקל, ולחץ כלוא שכבר אינו בורח יכול לדחוף אותו החוצה בקלות. הבסיס בצד הקרוב פונה אל כדור הארץ החם ואינו נאטם כל עוד הגוף מחובר. בניית הפסיק הלחץ של כדור הארץ להגיע אל הירח, ואיתו הלחץ הפנימי של הירח והפליטות. הימות הגדולים של הצד הקרוב היו אז חמים ובעלי צמיגות נמוכה, ולכן פני השטח שלהם חלקים, כמו אגם קפוא; הם קפאו אחר כך, לאט ומבחוץ פנימה, לאורך מאות מיליוני שנים ועד מיליארד או שניים — Serenitatis ראשונה, קרוב מאוד לכדור הארץ, ו-Imbrium אחרי הניתוק. המכתשים שעליהם קטנים ברובם: אחרי השחרור נמשכו אל הירח טיפות קטנות ובינוניות שכדור הארץ זרק, והן יצרו אותם (C.11§). הפתחים הישנים של הצד הרחוק נאטמו לפני השחרור. ימה אחת בצד הרחוק היא יוצאת דופן: Moscovienne נשארה פעילה זמן רב אחרי שהאחרות נאטמו. המחבר מציע שהיא הוזנה מ-Serenitatis, בזמן ש-Serenitatis עוד הייתה פנימית, לאורך מעבר ישר דרך פנים הירח בין השתיים, ולכן נשארה פעילה זמן כה רב.

הזרם אינו מותח את החלק העליון הצר של האגס בגרירה. הוא מותח אותו במה שהוא נושא ובחום שהוא מביא. הטבלה הבאה בודקת את שני האפקטים. לקצבי ההזנה של חלק A, לחלק העליון הצר של האגס — ברוחב 3,000 ק"מ ובאורך של כ-6,000 ק"מ — ולתך בצפיפות 3,000 ק"ג/מ"ק:

גודל	הזנה של 100 מיליון שנה (2.33×10^7) ק"ג/ש"	הזנה של 600 מיליון שנה (3.88×10^6) ק"ג/ש"
מהירות ממוצעת של הזרם	ס"מ/שנה 3.5	ס"מ/שנה 0.6

מספר Péclet לאורך החלק הצר	כ-6,600	כ-1,100
החום הנישא	$2.3 \times 10^{13} \text{ W}$	$3.9 \times 10^{12} \text{ W}$
הקרום הקפוא שהחום יכול לקיים	כ-7 ק"מ	כ-44 ק"מ
המשיכה הצמיגה על הדפנות, $\text{Pa s } \eta = 10^{19}$	$1.7 \times 10^{18} \text{ N}$	$2.8 \times 10^{17} \text{ N}$
המשיכה הזו לעומת עומס החיבור) $(\text{N } 4.06 \times 10^{22})$	0.004%	0.0007%

הזרם בחלק העליון הצר של האגס: הגרירה זניחה, החום אינו זניח.

שתי העמודות הן שני משכי ההזנה של חלק A (בשורה האחרונה גרסה קודמת נתנה 0.0006% להזנה של 600 מיליון שנה): כל מסת הירח נמסרת ב-100 מיליון שנה או ב-600 מיליון שנה. מספר Péclet משווה את המהירות שבה הזרם נושא חום לאורך האגס למהירות שבה החום דולף החוצה בהולכה; ערך של אלפים פירושו שהזרם מכניס חום מהר בהרבה ממה שהוא יכול לדלוף החוצה. הקרום הקפוא הוא הקרום החיצוני הקר שיכול להיווצר על החלק הצר בזמן שהזרם שומר על פנימו חם: ככל שהזרם מביא יותר חום, הקרום דק יותר. שתי השורות האחרונות נותנות את גרירת הזרם על הדפנות ומשוות אותה לעומס של C.2§.

הגרירה זניחה; החום אינו זניח. משיכת הזרם על הדפנות קטנה ממאית האחוז מעומס החיבור. ההסעה — נשיאת החום על ידי החומר הנע — עוקפת את ההולכה בשלושה סדרי גודל, ועל חלק צר ברדיוס 1,500 ק"מ קופא רק קרום של קילומטרים בודדים עד כמה עשרות קילומטרים: החלק הצר נשאר מותך ורך בזמן שהאגס נמשך החוצה, ובמגע החם והחשוף הגוף מתחיל להיפרד כשמרכזו מגיע לקו, ונמשך לחופשי מעט מעבר לו (C.8§). זה המגע החם והרך של C.5§, שמתנגד רק מעט.

8.c היכן הגוף עוזב: מרכזו מגיע לקו

סעיף זה קובע היכן מתרחש השחרור ומדוע הגוף עוזב במסלול ואינו נופל בחזרה. הגוף מתחיל להיפרד כשמרכז המסה שלו מגיע לקו הקורוטציה, ומשתחרר כ-210 ק"מ מעבר לו (C.5a§; מאמר 2, B.8§): שם המהירות שהוא נושא עם הסיבוב היא המהירות של מסלול מעגלי, ומעבר לקו כוחות הקורוטציה מושכים אותו החוצה; הלחץ הפנימי שמתחתיו מסייע. בקו רוחב φ הקו נמצא ב- $r_{\text{co}}/\cos^{2/3}\varphi$, כאשר $r_{\text{co}} = 16\,399 \text{ km}$ ביממה של 5.77 שעות. הקו מתרחק ככל שמתרחקים מן המשווה, כי בקו רוחב מסוים הגוף קרוב יותר לציר הסיבוב מאשר מרחקו מן המרכז, והוא מסתובב על מעגל קטן יותר; הוא צריך להיות רחוק יותר לפני שמהירות הסיבוב משתווה למהירות המסלול:

קו הרוחב של מרכז הירח	מרחקו ברגע השחרור (על הקו)
0°	ק"מ 16,399
5°	ק"מ 16,441
10°	ק"מ 16,567
15°	ק"מ 16,782
22.5° (מאמר 4)	ק"מ 17,287
25°	ק"מ 17,511

מרחק השחרור (קו הקורוטציה) לפי קו הרוחב של מרכז הירח, ביממה של 5.77 שעות. בהדגשה: השחרור שאומץ.

המרחק גדל לאט עם קו הרוחב: ב-888 ק"מ בין המשווה ל-22.5°, כ-5%. השחרור שאומץ, 17,287 ק"מ ב-22.5°, מודגש.

הגוף שם נמצא הרחק מעבר לגבול רוש הקשיח, 10,314 ק"מ ב-2,600 ק"ג/מ"ק, והוא מוחזק על ידי קליפתו הקשיחה והמעוגלת (מאמר 7, C.5§). המגע הוא גם הנקודה החלשה ביותר של המבנה כולו: המקום היחיד שהעור של הגוף לא כיסה, והמקום שבו האגס החם פוגש אותו.

מה האגס עושה לירח: הוא מרים אותו, והוא מסובב אותו. האגס פועל על הירח בשני כיוונים בבת אחת. רדיאלית, הוא מרים אותו: הלחץ שמושך את האגס החוצה מעלה את הגוף שבקצהו מפני השטח של כדור הארץ אל קו הקורוטציה, במחיר כבידתי של כ- 1.5×10^{30} ג'אול (A.12§). לצדדים, הוא מסובב אותו: מכיוון שהירח מחובר, האגס מסובב אותו עם כדור הארץ, ובכל קילומטר שהירח עולה יש לתת לו את המהירות הצדדית של הסיבוב במרחקו החדש. התמונה היא ילדה ההולכת החוצה על קרוסלה מסתובבת: ככל שהיא מתרחקת, היא צריכה לנוע מהר יותר לצדדים כדי להישאר עם הקרוסלה, והקרוסלה צריכה לדחוף אותה כדי לתת לה את המהירות הזו. האגס מספק את המהירות הזו דרך המגע, ובקו המהירות שנתן היא בדיוק המהירות של מסלול מעגלי שם:

שחרור	מרכז הירח	המהירות הצדדית שניתנה, $\omega r \cos \varphi$	מהירות מסלול מעגלי	התנע הזוויתי שניתן
משווה	ק"מ 16,399	'ק"מ/ש 4.96	'ק"מ/ש 4.96	$6.0 \times 10^{33} \text{ kg m}^2/\text{s}$
22.5°	ק"מ 17,287	'ק"מ/ש 4.83	(מאמר 4) —	$5.7 \times 10^{33} \text{ kg m}^2/\text{s}$

המהירות הצדדית והתנע הזוויתי שהאגס נותן לירח עד הגעתו לקו.

במשווה שתי המהירויות שוות, 4.96 ק"מ/ש: זו משמעות "על הקו". ב-22.5° המהירות הצדדית היא $\omega r \cos \varphi$, כי הירח מסתובב על מעגל ברדיוס $r \cos \varphi$ סביב ציר הסיבוב; המסלול הנובע ממנה מחושב במאמר 4. התנע הזוויתי — המסה כפול המהירות הצדדית כפול המרחק מן הציר, "כמות הסיבוב" שנשמרת כשאינן מומנט כוח חיצוני — ניתן בעמודה האחרונה. הוא מחושב כאן עם מסת הירח m סביב ציר הסיבוב של כדור הארץ; מאמרים 2 ו-4 נותנים 5.9×10^{33} למסלול ברגע השחרור — אותו גודל במשווה, כשהוא נכתב למסלול של שני גופים עם המסה המצומצמת m_r , הקטנה מ- m ב-1.2%.

התנע הזוויתי שהאגס מעביר לירח, כשישית מזה של המערכת, נלקח מסיבוב כדור הארץ — זו ההאטה שהליבה המתרכזת מקוזת (מאמר 2, A.4§). ההרמה מביאה את הירח אל הקו; הסיבוב נותן לו, כשהוא מגיע, את המהירות להישאר במסלול. לגוף שנזרק מכדור הארץ יש את הראשון וחסר לו השני:

מדוע הגוף צריך להינשא, לא להיזרק. הסיבוב נותן לגוף את המהירות ωr , שגדלה כלפי חוץ, ואילו מסלול צריך $\sqrt{GM/r}$, שיורדת; השתיים נפגשות רק ברדיוס הקורוטציה. גוף שמשתחרר מתחת לקו נופל בחזרה, תהא הדחיפה החוצה שהוא מקבל אשר תהא, כי דחיפה החוצה מוסיפה גובה אבל לא את המהירות הצדדית של מסלול. הטבלה עוקבת אחר גופים כאלה על כדור ארץ של 5.5 שעות. "הנקודה הגבוהה ביותר" ו"הנקודה הנמוכה ביותר" הן המרחק הגדול והמרחק הקטן ביותר של המסלול ממרכז כדור הארץ; נקודה נמוכה ביותר שמתחת לרדיוס כדור הארץ פירושה שהגוף חוזר אל כדור הארץ:

שחרר מ-(5.5 שעות)	דחיפה החוצה	הנקודה הגבוהה ביותר	הנקודה הנמוכה ביותר של המסלול
ק"מ 8,991	אין	ק"מ 8,991	ק"מ — לתוך כדור הארץ 909
ק"מ 8,991	'ק"מ/ש 6	ק"מ 17,037	ק"מ — לתוך כדור הארץ 867

ק"מ 8,991	ק"מ/ש 7	ק"מ 24,433	ק"מ — לתוך כדור הארץ 854
ק"מ 15,500	ק"מ/ש 1.4	ק"מ 20,241	ק"מ 11,396
ק"מ 15,800	ק"מ/ש 0.35	ק"מ 16,904	ק"מ 14,733

גופים שמשחררים מתחת לקו הקורטציה על כדור ארץ של 5.5 שעות, עם דחיפה החוצה ובלעדיה.

שלוש השורות הראשונות מתחילות ב-8,991 ק"מ, ראשו של גוף שיושב נמוך על כדור הארץ: תהא הדחיפה החוצה אשר תהא, אפילו 7 ק"מ/ש', המסלול עדיין יורד לכ-900 ק"מ מן המרכז, עמוק בתוך כדור הארץ. דחיפה מגביהה את הנקודה הגבוהה ביותר אבל כמעט אינה מזיזה את הנמוכה ביותר, כי היא אינה נותנת מהירות צדדית. רק שתי השורות האחרונות, שמשחררות קרוב לקו ב-15,800 ק"מ (הקו נמצא ב-15,818 ק"מ ליממה של 5.5 שעות), נשארות הרחק מכדור הארץ, ושם די בדחיפה קטנה. על הקו עצמו אין צורך בשום דחיפה.

העלייה בעודו מחובר היא שנותנת לגוף את המהירות הצדדית של מסלול. האגס עומד בקצב הסיבוב בזמן שהוא גדל: חומר שנישא החוצה צריך לקבל תנע זוויתי, והאגס מספק אותו, אבל בקצבי ההזנה של חלק A הגזירה שזה דורש מן החלק העליון הצר של האגס היא מסדר גודל של 0.03 פסקל — זניחה לחיבור מותר וצמיג — ולכן הפיגור אינו קריעה אלא הטיה: החלק החיצוני של האגס, שנישא הרחק מן הציר, מפגר אחר סיבוב כדור הארץ, והאגס כולו נוטה לאחור, מערבה, עם הירח בקצהו (B.1§). התנע הזוויתי שהירח עוד צריך מגיע אליו דרך המגע. על הקו הגוף נושא את המהירות של מסלול מעגלי; כשהוא משתחרר כ-210 ק"מ מעבר לו, הוא נושא מעט יותר ועוזב במסלול כמעט מעגלי שהפריגאה שלו היא נקודת השחרור (C.5a§; מאמר 4). הכבידה מחזיקה אותו במסלול הזה, והגאות שהוא מעורר בכדור הארץ, המסתובב מהר יותר, מושכת אותו קדימה והחוצה במשך מיליוני השנים שאחר כך.

C.9 מה האגס דורש

האגס הוא מבנה גדול, והמודל צריך לתת דין וחשבון על מחירו. סעיף זה מרכז את הדרישות שלו; כל אחת מהן היא תנאי שהמנגנון מציב לעצמו.

- **מסה.** לרוחבים של C.7§ בצפיפות 3,000 ק"ג/מ"ק, מפני השטח של כדור הארץ ועד המגע, האגס מכיל כ-11% ממסת כדור הארץ, כתשע מסות ירחיות — הבסיס של 9,000 ק"מ של C.7§; לבסיסים של 9,000–11,000 ק"מ הוא מכיל כתשע עד שתים-עשרה. מכיוון שהוא נמצא כולו בתוך קו הקורטציה, שום שארית של החיבור אינה נשארת במסלול; לאחר השחרור ההתמיינות אוספת אותו בחזרה אל כדור הארץ לאורך עשרות עד מאות מיליוני שנים, וכדור הארץ חוזר להיות עגול: החלק הכבד שלו עמוק אל תוך כדור הארץ מתחת לבסיס האגס (חלק E), וחזיתו וגבו לפסים ולקשתות של האוקיינוס השקט (מאמר 9; C.7§).
- **אנרגיה.** הרמת האגס הזה בשדה המסתובב עולה כ- 8×10^{30} ג'אול — יותר מפי חמישה (כפי 5.4) מהרמת הירח עצמו (גרסה קודמת אמרה כפי שישה) (A.12§). ההתפתחות שמשחררת אותה — שקיעת הברזל אל הליבה, המשחררת אנרגיה מסדר גודל של 10^{31} ג'אול — היא אותה התפתחות שמניעה את העלייה; החשבון המלא הוא דרישה (D.1§). כשהברזל שוקע, האנרגיה הכבידתית שהוא מוותר עליה מספיקה, בסדר גודל, להרים את האגס.
- **תנע זוויתי וחום.** האגס המתארך מאט את סיבוב כדור הארץ והליבה המתרכזת מאיצה אותו; מאמר 2 (A.4§) לוקח את שניהם בחשבון. האגס החוזר משחרר את האנרגיה הפוטנציאלית שלו כחום, שנכנס להיסטוריה התרמית של גוף האם.
- **לחץ.** המקור צריך להרים ולהחזיק את האגס בנוסף לגוף; את מבחן הלחץ של A.9–A.13§ יש לחזור עליו עם מסת האגס.

- **הפחיסות של גוף האם.** מבחן הלחץ משתמש בשדה כדורי. גוף האם הפחוס ($J_2 \approx 0.036$) מגדיל את המשיכה פנימה בכ-3% במרחק 9,000 ק"מ מן המרכז במשווה וב-1.4% ב-25° צפון, וב-5.4% על פני השטח המשווניים עצמם, במקום שבו העמוד יוצא מגוף האם (גרסה קודמת אמרה "3% לכל היותר ליד פני השטח"); לאורך העמוד החיצוני המחיר עולה בכ-3%, וגם אילו כל מחיר ההרמה עלה ב-3%, כ-4 ג'יגה-פסקל, המרווח של 10.49 ג'יגה-פסקל היה נושא אותו. קו הקורטציה במשווה זו החוצה בכ-50 ק"מ. (J_2 הוא המדד המקובל לבליטה המשוונית של כוכב לכת בשדה הכבידה שלו; הערך כאן הוא של גוף האם המסתובב).
- **הצורה עצמה.** הרוחבים והמסות שלעיל מתקבלים מחתכים עגולים בצפיפות אחידה, בלי זרימה; צורת שיווי המשקל של כדור ארץ מסתובב, בלחץ פנימי, עם גוף בקצהו, היא החישוב שנותן.

C.9a אין טבעת סביב כדור הארץ הצעיר

כוכב לכת צעיר, מהיר ועשיר בחומרים נדיפים, שפולט אדים דרך הסדקים שלו, יכול להקיף את עצמו בטבעת: האדים עולים, מתעבים גבוה יותר לקרח ולאבק, ומקיפים את הכוכב במהירות מסלולית. סביב כדור הארץ הצעיר של המודל הזה טבעת כזו לא יכלה להיווצר, מארבע סיבות.

1. **האגס טאטא את המקום.** האגס הסתובב עם כדור הארץ פעם ביממה, עד קו הקורטציה. בתוך הקו, חומר של טבעת היה מקיף מהר יותר מסיבוב האגס; הוא היה משיג את האגס ופוגע בו. כל מה שהתעבה ברצועה של האגס נאסף אליו ונעשה חומר של הגוף שבקצהו.
2. **לחומרים הנדיפים הייתה דרך.** החיבור הרחב והחם נשא את ההתק העשיר בחומרים נדיפים מעלה אל תוך הגוף (חלק A). את מה שכוכב פולט מאבד לחלל, כדור הארץ הזין אל הירח.
3. **חם מדי, קרוב מדי לשמש.** כדור הארץ הצעיר היה חם ועטוף באטמוספירת אדים (מאמר 6, J.38); בגבהים שבהם הייתה עומדת טבעת, מים לא התעבו לקרח.
4. **הירח מפנה את השאר.** אחרי השחרור הירח, כבד ונמצא כ-7,200 ק"מ מעבר לגבול רוש הקשיח (C.5a§), היה מסלק כל שארית בגאות שלו ובתהודות שלו.

הירח נושא את התיעוד של ההיעדר הזה. גוף שעובר דרך טבעת נשחק: השקעים שלו נשחקים ונעשים רדודים, השפות שלו מתעגלות, המכתשים הקטנים שלו נמחקים, והגוף עצמו קטן — פני השטח החלקים של Deimos הם דוגמה אחת לכך. הרמות של הירח שומרות תיעוד רווי של מכתשים, והירח שמר על מסתו: הוא מעולם לא עבר דרך טבעת (מאמר 6, L.8§).

C.10 ממה עשוי הגוף: שלוש שכבות מאגס אחד

האגס אינו רק נושא את הגוף; הוא קובע ממה הגוף עשוי. סעיף זה עוקב אחר כל אחת משלוש השכבות של הירח — קרום, מעטפת וליבה — בחזרה אל המקום שממנו באה באגס.

האגס ממיינ את מה שהוא נושא. מעל אזור הבנייה השכבה החיצונית של גוף האם היא סיאלית — קלה ועשירה בצורן ובאלומיניום — והיא מונחת על הסימה הצפופה יותר, העשירה במגנזיום, שמתחתיה. הסיאל לא היה יבש: הגבול בין שתי השכבות היה משומן, וכשהאגס נמשך החוצה הסיאל גלש במעלה האגס על הסימה, לאורך צדדיו, אל הקצה — בכיוון ההתמיינות החוצה, בכוחות הסיבוב — והגבול המשומן הקל על הגלישה בגזירה. כשהקצה שוחרר, הסיאל הלך איתו והפך לעורו — מעל הכיפה העליונה כקליפה, ומעל הטבעת של הכיפה התחתונה כסיאל שהגוף ישב עליו והתקלף יחד איתו (C.4a§); רק במגע הוא הותר והוסר על ידי החום. הצד הרחוק נושא את הקרום העבה כי שכבות רבות של סיאל דחוס הצטברו שם, עם החומר שחזר שוב ושוב (B.7§). חלק מן הסיאל לא נשאר על פני השטח; הוא חדר אל פנים הירח.

מתחת לעור, הגוף הוא ההזנה: המעטפת של כדור הארץ עצמו, שהורמה על ידי הלחץ ונישאה לאורך האגס. כל המתכת של הירח היא ארצית. הרבה ברזל נכנס לאגס, ופחות ממנו ככל שמתקרבים לקצהו. לאורך האגס כולו, שנמצא בתוך קו הקורטוציה, הכבידה האפקטיבית מכוונת אל כדור הארץ, ולכן החומר הכבד שקע בחזרה במורד האגס בעוד החומר הקל עלה אל הקצה — והלחץ מרים מלכתחילה רק חומר קל מכ-3,864 ק"ג/מ"ק (A.10§). האגס פעל כעמוד שיקוע: גרגרים כבדים שוקעים וקלים עולים, כפי שחול שוקע מתחת למים בצנצנת מנוערת. לכן רוב הברזל שנכנס לאגס חזר לכדור הארץ יחד עם שאר האגס לאחר השחרור; הירח שמר רק את מה שהגיע לקצה. בניתוק היה החומר הכבד של הליבה בשליש האחרון של הגוף; הוא לא עבר את קו הקורטוציה, וחזר במורד האגס. לכן ליבת הירח קטנה: היא ברזל ארצי שהגיע לקצה, בעוד שרוב חומר הליבה שבאגס חזר לכדור הארץ. הזרם שעבר לאורך האגס נשא חום וחומר עשיר בברזל לתוך הגוף דרך Mare-i Mare Imbrium — Serenitatis עד שהתקלפה, Imbrium עד הניתוק — הפתחים שחיברו את ההזנה מפנים כדור הארץ אל פנים הירח (B.4§).

הטבלה מציבה כל שכבה של המודל לצד מה שנמדד על הירח:

שכבה	במודל	מה שנמדד
קרום	הסיאל שנוקז אל הקצה ושוחרר איתו; חלקו נישא אל הפנים	קרום אנורתוזיטי עשיר באלומיניום, עבה בצד הרחוק ודק בצד הקרוב
מעטפת	המעטפת של כדור הארץ, שהורמה על ידי הלחץ ונישאה לאורך האגס	אוליבין ופירוקסן; איזוטופי חמצן שאינם ניתנים להבחנה מאלה של כדור הארץ
ליבה	ברזל ארצי שהגיע לקצה; רוב חומר הליבה שבאגס חזר לכדור הארץ	ליבה ברדיוס של כ-330 ק"מ [5], אחוז עד שניים ממסת הירח, לעומת שלישי בכדור הארץ

שלוש שכבות הירח: מקורן במודל ומה שנמדד.

כל שורה מתאימה: קרום עשיר באלומיניום משכבה עשירה באלומיניום, מעטפת עם איזוטופי החמצן של כדור הארץ מן המעטפת של כדור הארץ, וליבה קטנה משום שרוב הברזל חזר במורד האגס.

התקציב מאפשר זאת. סיאל בעובי 30 ק"מ על פני אזור בגודל אגן האוקיינוס השקט מכיל כ- 1.4×10^{22} ק"ג בצפיפות הקליפה, 2,800 ק"ג/מ"ק (גרסה קודמת נתנה 1.3×10^{22}), בערך פי ארבעה מן הקרום הירחי; עד עשירית ממסת הירח של סיאל שנישא אל הפנים היה מוריד את צפיפותו הממוצעת בכ-65 ק"ג/מ"ק ומעלה את האלומיניום שלו בכ-1.5 אחוז, בתוך אי-הוודאות של המודלים הנוכחיים. משתמע מכך מבחן אחד. האנורתוזיט של הקרום דל באשלגן ובתוריום, ואילו הסיאל של כדור הארץ עשיר בהם; קרום העשוי מן הסיאל של כדור הארץ חייב היה לאבד אותם בהתכה ובזיקוק של העור, והרכב האנורתוזיטים הירחיים הקדומים ביותר הוא המקום לבחון זאת.

C.11 אחרי השחרור: כדור הארץ ממשיך לזרוק

השחרור לא סיים את פעילותו של כדור הארץ. הפתחים שלו המשיכו לזרוק חומר; רובו נפל בחזרה לכדור הארץ, וחלקו הגיע לירח, שהיה אז גוף נפרד שהתרחק מכמה רדיוסי כדור ארץ. כדי להגיע לירח החומר היה צריך לעזוב את כדור הארץ מהר יותר ככל שהירח התרחק, כל החומר היה חם מאוד: החלקים הגדולים יצאו ראשונים, וככל שסערת המאגמה שככה נפלטו חלקים קטנים, עדיין חמים, כך שהחלקים שהגיעו לירח נעשו קטנים יותר עם הזמן. הירח שמר את התיעוד, בשלוש מדידות:

מה נמדד	תוצאה	היכן
---------	-------	------

המכתשים הקטנים האחרונים, ביבשה, כשכל הימות הוסרו	פי 1.19 יותר מכתשים טריים של 1–2 ק"מ בצד הקרוב (1.12–1.27)	מאמר 6, מחקר 9
קרקעית הימות	מסודרות לפי זמן הקפיאה: ימות המגע, שקפאו אחרונים, הנקיים ביותר	מאמר 5, מחקרים 7 ו-12
מצב המכתשים על הימות	גדולים ומותכים, בינוניים ומרוחים, קטנים וחדים: חלקים גדולים מוקדם, קטנים מאוחר, כולם חמים	מאמרים 5 ו-6, חלק משותף

התיעוד שהירח שמר מן הזריקה שאחרי השחרור, בשלוש מדידות.

השורה הראשונה היא המדידה הישירה, בגוון ירוק: על הרמות בלבד, כשכל הימות הוצאו בשני הצדדים כך שההשוואה היא של שווה מול שווה, הצד הקרוב נושא פי 1.19 מכתשים טריים של 1–2 ק"מ מן הצד הרחוק. השורה השנייה והשלישית קוראות את אותה היסטוריה בימות: הקרקעיות קפאו לפי הסדר, והמכתשים שעליהן מדורגים מגדולים ומותכים ועד קטנים וחדים.

הצד הקרוב, הפונה אל כדור הארץ, איבד את המכתשים הישנים שלו מוקדם, לחום של המגע ולימות שלו עצמו, ואסף יותר מן המכתשים האחרונים. המפזר האחרון של מכתשים על הירח היה כדור הארץ. התיעוד הזה חותם את התיאור של החיבור: הגוף ששוחרר לא נחתך מגוף אם שקט, אלא מכדור ארץ שהפתחים שלו עדיין היו פעילים, ושפעילותו דעכה ככל שהירח התרחק. שטף של גופים מבחוץ, כפי שהספרות מפרשת את המכתשים הקטנים, אינו חוזה עודף בצד הקרוב, אלא רק עודף קטן בצד המוביל.

חלק D — תחזיות, מבחנים ומסקנות

הבעיה

הקורא צריך לדעת אילו תוצאות ניתנות לבדיקה, וכיצד. אנו מרכזים את הדרישות, במקום למנות התאמות איכותיות כהוכחות בלתי תלויות.

חלקים A–C בנו את המנגנון: חלק A תמחר את ההזנה מבפנים, חלק B עקב אחר הקליפה שעלתה מבחוץ, וחלק C חיבר את השניים דרך האגס והשחרור שלו. חלק זה הופך את אותן תוצאות למבחנים. הסיבה לרכז אותן במקום אחד פשוטה: מודל יכול תמיד למצוא תכונות שנראות כמוהו, וספירה של התאמות כאלה אחת אחת מוכיחה מעט. מה שמכריע הוא אם כל דרישה ניתנת לניסוח במספר או בגאומטריה, ואם יש מדידה או חישוב שבודקים אותה. לכן כל שורה בטבלה שלהלן נותנת טענה, את הדרישה הכמותית שמאחוריה ואת המבחן שבדוק אותה.

D.1 מבחני המנגנון

הטבלה נקראת שורה אחר שורה. שש השורות הראשונות הן דרישות מן המנגנון עצמו (לחץ, קצב, אנרגיה, יציבות, התקררות, שחרור); ארבע השורות הבאות הן תחזיות על פני הירח ועל הקרום שלו, הנובעות מכלל החלקים של חלק B; שלוש האחרונות נוגעות בנקודת השחרור ובגורלו של האגס.

טענה	הנחות ודרישה כמותית	מבחן
הזנה בלחץ	$p_s > p_{\text{head}} + p_{\text{load}} + \Delta p_{\text{loss}}$ לאורך המסלול	משוואת מצב ופתרון לחץ על אותו פרופיל מסה
קצב הבנייה	האינטגרל של ההזנה נטו מספק את M_{int} בזמן העומד לרשות התהליך	זרימה התלויה בצמיגות, בפתח ובזמן
אנרגיה	התפתחות המערכת מספקת את העבודה ואת האובדנים תוך שימור אנרגיה	חשבון של כבידה, סיבוב, חום וחומר שעוזב
גוף מחובר יציב	איזון מאמצים בכל הכיוונים ומעבר רציף של חומר	פתרון תלת-ממדי עם גבול חופשי
חוץ מתחזק ובסיס נייד	תחום משותף של התקררות חיצונית וניידות פנימית	איזון תרמי וראולוגי מצומד
חיבור ושחרור	נשיאת העומס עד למצב שחרור מתאים, ואחריה כשל	התפתחות המאמצים, הצורה והזרימה בחיבור
סדר השלבים	התעגלות החוצה, אחריה פחיסות, אחריה התעגלות פנימה, מתקדמת היטב לפני הניתוק; ההשלכה נמשכת לאורך כל הדרך, והיציאות הגדולות בשלב הפחיסות	מודל תזמון משותף לחלקים A ו-B

כלל החלקים	בהתעגלות החוצה כל חלק שומר על חלקו בשטח הפנים (B.4§)	שלושה אזורים קונצנטריים סביב מרכז המגע (24.1° צפון 335.2° מזרח): המגע — כיפה של כ-31°, הטבעת שנקלפה — חגורה עד 70°, הכיפה העליונה — מעבר לה, מול סוגי האגנים ועובי הקרום (מאמר 11)
תיעוד נישא	מכתשים שנוצרו על הקליפה החשופה נעים איתה ושומרים על גודלם; הקטבים אוספים אותם בהתעגלות פנימה	האוכלוסייה העתיקה ביותר צפופה ביותר בצד הרחוק, פחות בחגורה, הכי פחות בכיפה; אין הבדל קנה מידה בין הרחוק לקרוב; סטטיסטיקת מכתשים לפי אזור ומבחני גודל (מאמר 7, D.5§)
קרום מרובד בצד הרחוק	קרום הצד הרחוק, שכבות רבות של סיאל דחוס, נבנה מסיאל שנדד אל הקצה ומחומר שחזר שוב ושוב; ההתמיינות מתקדמת עם הזמן, והיציאות המאוחרות קלות יותר ועשירות יותר בנוזלים (B.7§)	תכולת הברזל בקרום הצד הרחוק עולה עם העומק, כל שכבה מוקדמת עשירה יותר בברזל; יותר מאשר בצד הקרוב; נקרא מהרכב הפסגות המרכזיות מול עומק המקור, הצד הרחוק מול הקרוב
שחרור על הקו	הירח מתחיל להיפרד כשמרכז המסה שלו מגיע לקו הקורוטציה, ומשתחרר כ-210 ק"מ מעבר לו; המגע מתנגד רק מעט, והגוף נמשך החוצה בכוח (C.5, § C.8)	מרווח $2d_0 \approx$, כ-210 ק"מ, מגע בעובי של כ-105 ק"מ (C.5a§); גרסה קודמת נתנה כ-100 ק"מ, 40–100 ק"מ למגע בעובי 20–50 ק"מ)
האגס נוטה צפונה	מבסיס סמוך ל-1.9° צפון מגיע הקצה לכ-22.5° צפון; הסיבוב דוחף לעבר המשווה, והנטייה באה מן ההזנה, שעולה באלכסון ממקור עמוק מצפון למשווה (A.4, B.1§)	הגאומטריה של המקור העמוק ושל מסלול ההזנה, מול מיקום הבסיס (חלק E)
האגס נאסף בחזרה בשלמותו	האגס נמצא כולו בתוך קו הקורוטציה (C.7, C.9§); ההתמיינות אוספת אותו בחזרה אל כדור הארץ לאורך עשרות עד מאות מיליוני שנים אחרי השחרור, וחלקו הכבד שוקע עמוק אל תוך כדור הארץ מתחת לבסיס האגס (חלק E)	אין שארית של החיבור במסלול; בסיס האגס מעל האזור העמוק שמתחת לאוקיינוס השקט (חלק E)

כיצד לקרוא את השורות. השורה הראשונה היא תקציב הלחץ של חלק A בשורה אחת: לחץ המקור p_s חייב לעלות על הסכום של העמוד ההידרוסטטי p_{head} (משקל עמוד החומר שיש להרים, מן המקור ועד קו הקורוטציה — המרחק שבו גוף שמסתובב עם כדור הארץ כבר נע במהירות של מסלול חופשי), העומס p_{load} של הגוף העומד על החיבור, והאובדנים Δp_{loss} של הזרימה הצמיגה לאורך המסלול. חלק A מוצא שהיתרה הזאת חיובית לכל נתן עמוק קל מכ-3,864 ק"ג/מ"ק. השורה השנייה שואלת אם ההזנה מהירה מספיק: הזרימה נטו, כשמסכמים אותה לאורך הזמן, חייבת לספק את המסה הפנימית M_{int} בתוך הזמן העומד לרשות התהליך. בתרחיש הזמן הזה הוא כ-600 מיליון שנה, מתחילת הבליטה ועד השחרור לפני 3.873 מיליארד שנה — כ-400 מיליון שנה לבליטה ולאגס, כ-100 מיליון שנה לפחיסות ועוד כ-100 מיליון שנה עד השחרור — ו-100 מיליון שנה נשמרים כמקרה רגישות (חלק A). המבחן הוא הזרימה בכל התחום המותר של צמיגות ופתח: היא צריכה להיות מהירה מספיק, והמעבר צריך להישאר פתוח עד שהגוף הושלם.

השורות השלישית עד השישית שואלות אם האנרגיה קיימת, אם הגוף המחובר יציב בשלושה ממדים, אם החוץ שלו יכול להתקשות בעוד הבסיס נשאר נייד, ואם החיבור נושא את העומס עד הרגע הנכון ואז נכנע. כל אחת מהן נבדקת בחישוב על פני כל התחום המותר: אנרגיה שכדור הארץ המתפתח משחרר, גוף שנשאר שלם בזמן שמסתו נאספת, התקררות וניידות שחופפות בזמן, וחיבור שאינו נכנע מוקדם מדי (הגוף היה נופל בחזרה או מתפרק) ואינו מחזיק לעד. השורה השביעית קובעת את סדר האירועים: הגוף מתעגל תחילה החוצה, אחר כך נפחס, אחר כך מתעגל פנימה, והרצף הזה מתקדם היטב לפני הניתוק. היא נבדקת במודל תזמון אחד המשותף להזנה, להתקררות ולכשל החיבור.

ארבע השורות הבאות הן תחזיות הכתובות על הירח עצמו. כלל החלקים אומר שכאשר הגוף המעוך התעגל החוצה, כל חלק בפני השטח שלו שמר על חלקו מן השלם: המגע הפך לכיפה בצד הקרוב, של כ- 31° סביב מרכז המגע, הטבעת שנקלפה הפכה לחגורה עד 70° , והכיפה העליונה היא כל השאר — הצד הרחוק. הוא נבדק על ידי שרטוט סוגי האגנים ועובי הקרום מול המרחק הזוויתי ממרכז המגע, 24.1° צפון 335.2° מזרח (מאמר 11). התיעוד הנישא אומר שמכתשים שנוצרו על הקליפה החשופה נעו איתה ושמרו על גודלם, ושהקטבים אספו אותם בזמן ההתעגלות פנימה: אוכלוסיית המכתשים העתיקה ביותר צריכה להיות צפופה ביותר בצד הרחוק, פחות צפופה בחגורה והכי פחות צפופה בכיפה, בלי הבדל קנה מידה בין הרחוק לקרוב. הוא נבדק בסטטיסטיקת מכתשים לפי אזור ובמבחני גודל (מאמר 7, D.5§). הקרום המרובד בצד הרחוק אומר שהצד הרחוק נבנה שכבה על שכבה, והשכבות המאוחרות קלות יותר ועשירות יותר בנוזלים, כך שתכולת הברזל עולה עם העומק, ויותר בצד הרחוק מאשר בצד הקרוב. הפסגות המרכזיות של מכתשים מעלות חומר מעומק ידוע, ולכן ההרכב שלהן מול עומק המקור מודד את הפרופיל.

שלוש השורות האחרונות נוגעות בשחרור ובמה שבא אחריו. שחרור על הקו: הירח מתחיל להיפרד כשמרכז המסה שלו מגיע לקו הקורטציה, ומשתחרר כ-210 ק"מ מעבר לו ($\Delta r \approx 2d_0$), מגע בעובי של כ-105 ק"מ; חיפוש מרחק השחרור של C.5a§; המגע מתנגד רק מעט, והגוף נמשך החוצה בכוח — המשיכה שמשכה את רכסי השפכטל. זהו השחרור שהמסלול של מאמרים 2 ו-4 דורש. האגס נוטה צפונה: הבסיס עמד סמוך ל- 1.9° צפון, ואילו הקצה הגיע לכ- 22.5° צפון. הסיבוב לבדו דוחף חומר לעבר המשווה, ולכן הנטייה צפונה חייבת לבוא מן ההזנה, שעלתה באלכסון ממקור עמוק מצפון למשווה; היא נבדקת מול הגאומטריה של המקור העמוק ושל מסלול ההזנה, ומול מיקום הבסיס (חלק E). האגס נאסף בחזרה בשלמותו: מכיוון שהאגס נמצא כולו בתוך קו הקורטציה, שם כבידת כדור הארץ עולה על המשיכה החוצה של הסיבוב, דבר ממנו לא יכול היה להישאר במסלול. הוא חלק מכדור הארץ, ולאחר השחרור ההתמיינות אספה אותו בחזרה אל כדור הארץ לאורך עשרות עד מאות מיליוני שנים (חלק E).

דוגמת צפיפות אחת מדברת בשם הדוגמה הזאת, ולא בשם כל תרחיש של הזנה מחוברת; ומעבר של מבחן לחץ אחד אינו מכריע לבדו את היציבות, האנרגיה או החיבור. מערכת פרמטרים אחת חייבת לקיים את כל הדרישות. זה הרף שהמאמר מציב לעצמו: שלוש-עשרה השורות אינן שלושה-עשר קולות בלתי תלויים בעד המודל, אלא שלושה-עשר תנאים שאותו כדור ארץ, אותה הזנה ואותו גוף חייבים לעמוד בהם בבת אחת.

D.2 תוצאות שאפשר לחפש על הירח

השאלה של סעיף זה היא באילו תכונות של הירח של היום המנגנון נוגע ישירות, ועד כמה אפשר להשתמש בכל אחת מהן כמבחן.

אם צד אחד קיבל הזנה וחימום ממושכים יותר והצד שמנגד התקרר מוקדם יותר, צפויה אסימטריה תרמית ומבנית. במודל, הצד הקרוב ישב על המגע, מעל ההזנה, ונשאר חם זמן רב יותר, ואילו הצד הרחוק היה הכיפה העליונה, חשוף ומתקרר. הסימן והעוצמה של האסימטריה תלויים גם בחומר החיצוני, בערבוב ובהתפתחות המאוחרת. נתוני GRAIL — זוג חלליות שמיפו בפירוט את שדה הכבידה של הירח — נותנים אילוצים על הצפיפות ועל העובי של הקרום [4]; ההשוואה המלאה בין התצפיות לבין דרישות המודל שייכת למאמר 11.

הסטה של מרכז המסה תלויה בהתפלגות הצפיפות כולה. מרכז המסה של הירח אינו חייב להתלכד עם מרכז הצורה החיצונית שלו; המרחק ביניהם נתון על ידי

$$\Delta \mathbf{r}_{CM} = \frac{1}{m} \int_V \delta \rho(\mathbf{r}) \mathbf{r} dV.$$

כאן m היא מסת הירח, V הנפח שלו, $\mathbf{r}$ המיקום של נפח קטן dV הנמדד ממרכז הצורה, ו- $\delta \rho(\mathbf{r})$ הסטייה (24) של הצפיפות בנקודה זו מן הממוצע. במילים: כל מקום הצפוף מן הממוצע מושך את מרכז המסה אליו, כל מקום הקל מן הממוצע דוחה אותו, וכל אחד משוקלל במרחקו מן המרכז.

לכן אי אפשר להסיק אותה מעובי הכיפה לבדו, בלי לבחור ניגוד צפיפות ופיצוי. קרום עבה בצד אחד מזיז את מרכז המסה הרחק מן הצד הזה רק במידה שהקרום קל מן החומר שמתחתיו, ורק במידה שהשכבות העמוקות לא הסתגלו כדי לאזן אותו (פיצוי). נוכחותו של רכיב מתכתי בירח, שנבדקה סייסמית [5], מחייבת גם היא במודל מנגנון העברה והפרדה מתאים; היא אינה מוכיחה שהמתכת הגיעה דווקא דרך אזור ההזנה המרוכז מצפון למשווה שהוצע בחלק A.

התחזית התצפיתית המבחינה חייבת להיות צירוף מוגדר של כיוון, גאומטריה, הרכב וגיל. מספר שנגזר מהתאמה לתצפית אינו תחזית בלתי תלויה שלה: אם פרמטר נבחר כך שהמודל ישחזר ערך שנמדד, אי אפשר אחר כך למנות את ההתאמה הזאת כהצלחה. תיעוד המכתשים הנישא על הכיפה מנוסח ב-B.6S ונבדק במאמרים 11 ו-6.

D.3 החידוש והיקף המסקנה

העבודה בוחנת את הבנייה הפנימית של גוף מחובר דרך מערכת אחת של דרישות לחץ, קצב, מסה ומאמץ, בתוך המסגרת הסיבובית של LEF. התוצאה המיוחדת של חלק A היא שהרחבת המעבר מקלה על התמיכה הרדיאלית ועל הזרימה, אך מגדילה את מסת החיבור ואינה מסירה את העומס הצדי. קל יותר לדחוף חומר דרך צינור רחב, והוא מחזיק את העמוד שלו ביתר קלות, אך ככל שהוא רחב יותר הוא שוקל יותר, והמשיכה הצדית של המערכת המסתובבת עליו נשארת. התוצאה המיוחדת של חלק B היא שגוף במסת הירח היושב על מגע של 6,000 ק"מ, שכיפתו העליונה מתנשאת כ-3,650 ק"מ מעל השפה, תוחם נפח של 5.65×10^{19} מ"ק — פי שניים מ- 2.83×10^{19} המ"ק של הכדור ברגע השחרור — ולכן יש לו הצפיפות המוקצפת שחלק A דורש, 1,300 ק"ג/מ"ק — הצפיפות הנמוכה של נתך מלא בועות גז — וקרום הצד הרחוק ואזורי החשיפה נובעים מאותה גאומטריה: הצד הרחוק נבנה שכבה על שכבה, הצד הקרוב התקלף. חלק C מחבר את השניים: המגע הרחב שחלק A דורש הוא הבסיס של הכיפה של חלק B, ובקו הקורוטציה הגוף מתחיל להיפרד, ומשתחרר כ-210 ק"מ מעבר לו.

משוואות הכבידה, הלחץ והזרימה הן פיזיקה סטנדרטית. הארכיטקטורה של LEF והיישום של המבחן המשותף הם התרומה של עבודה זו. אין כאן טענה לקדימות היסטורית לגבי כל רכיב במודל ללא סקירת ספרות ייעודית; מפת המקורות והסיווג מופיעה בנספח A.

המאמר מסתיים בניתוח היתכנות, בתוצאה שלילית חדה אחת — מעבר גלילי חסר מסה, המעביר לחץ בלבד, אינו יכול לבנות את הירח — ובתוצאה גאומטרית אחת שעונה לה: החיבור הרחב, החם והמסיבי שהתוצאה השלילית דורשת הוא הקצה הרחב של האגס, חלק מכדור הארץ שמוחזק בכבידה של כדור הארץ, הנושא גוף בעל מסת הירח בצפיפות המוקצפת. התוצאה השלילית סוגרת את התמונה הפשוטה ביותר, צינור דק שדרכו לחץ לבדו דוחף את הירח החוצה; התוצאה הגאומטרית מראה שהחיבור שהפיזיקה כן דורשת אינו הנחה נוספת, אלא הצורה שכדור הארץ עצמו מקבל. משוואת המצב העמוקה, שחרור האנרגיה והמבנה התלת-ממדי הם שלוש הדרישות שהוא מעביר הלאה, כל אחת מנוסחת עם המבחן שלה ב-D.1S.

D.4 מסקנות

המסקנות הולכות בסדר המאמר: מערכת המבחנים (1), הלחץ (2), המעבר (3), ההתקררות (4), העומס הצדי (5), האגס והשחרור (6), הגוף על הקצה (7), והקרום והדרישות המועברות הלאה (8).

1. הזנה פנימית של גוף מחובר ניתנת לניסוח דרך מאזני מסה, לחץ, תנע ואנרגיה. המאמר מגדיר מערכת מבחנים כמותית למנגנון.
 2. במבחן הלחץ הכדורי שהוגדר, צפיפות עמוקה של 3,500 ק"ג/מ"ק משאירה 10.49 ג'יגה-פסקל לפני עומס ואובדנים; 4,000 ק"ג/מ"ק נכשלת. סף האפס הוא כ-3,864 ק"ג/מ"ק בהנחות שצוינו: נתן עמוק קל מזה יכול להיות מורם עד קו הקורוציה בלחץ המקור, וכבד ממנו — לא.
 3. במבחן המשותף של המצב שאינו משווני, רדיוס מעבר של כ-1,000 ק"מ הוא סף האיזון הרדיאלי עבור הקלטים שנבחרו. כבר בסף הזה מסת המקטע החיצוני היא כ-0.46 ממסת הירח, ולכן אי אפשר להזניח אותה בחשבון המערכת: מעבר רחב מספיק כדי לשאת את ההזנה שוקל בעצמו כמעט חצי ירח.
 4. מפל תרמי נותן בסיס לבחינה כיצד החוץ יכול להתחזק בעוד הפנים נשאר נייד. העובי הסופי ושימור המבנים מחייבים פתרון תרמי וראולוגי מצומד.
 5. מבחן המאמץ הצדי פוסל תמיכה על ידי לחץ בלבד דרך חתך רדיאלי במצב שנבחר. החישוב שאינו משווני מציב דרישות חיבור בסדר גודל של 10^{22} ניוטון בדוגמאות שנבדקו. רכיב רדיאלי אפסי אינו מבטל את העומס הכולל ואינו קובע לבדו את הניתוק.
 6. התעגלות, לחץ וסיבוב משתתפים יחד בניתוק מחיבור רחב; הבליטה נמשכת לאגס, חלק מכדור הארץ, שקצהו הופך לגוף; הגוף מתחיל להיפרד כשמרכז המסה שלו מגיע לקו הקורוציה — כ-16,400 ק"מ במשווה, 17,287 ק"מ ב- 22.5° — ומשתחרר כ-210 ק"מ מעבר לו, כשהלחץ הפנימי מסייע (C.7–C.8). האגס מרים את הירח רדיאלית, ומכיוון שהירח מחובר, הוא נותן לו את המהירות הצדית של מסלול. לאחר השחרור ההתמיינות אוספת את האגס בשלמותו בחזרה אל כדור הארץ לאורך עשרות עד מאות מיליוני שנים: חלקו הכבד שוקע עמוק אל תוך כדור הארץ מתחת לבסיס האגס, הצד הקדמי שלו נאסף לתוך הפסים של צפון האוקיינוס השקט, והגב שלו לתוך הקשתות של מערב האוקיינוס השקט (מאמר 9, *The Stripes*; חלק E). המסה אינה עוזבת את כדור הארץ; היא עוברת מגבוה בחוץ אל עמוק בפנים.
 7. הגוף יושב על הקצה הרחב של האגס, גוף מעוך מעל אזור מגע של 6,000 ק"מ, שהכיפה העליונה שלו מתנשאת לגובה של כ-3,650 ק"מ בצפיפות המוקצפת של 1,300 ק"ג/מ"ק. הוא מתעגל החוצה כשכל חלק שומר על חלקו בשטח הפנים: המגע הופך לכיפה בצד הקרוב, של כ- 31° , הטבעת שנקלפה לחגורה עד 70° , והכיפה העליונה לצד הרחוק. אחר כך הוא נפחס ומתעגל פנימה.
 8. קרום הצד הרחוק הוא הסיאל של כדור הארץ — הקליפה החיצונית הקלה, העשירה בצורן ובאלומיניום — והחומר שחזר שוב ושוב, שכבות רבות של סיאל דחוס, חלק קטן ממסת הירח; קרום הצד הקרוב הוא הסיאל של הכיפה התחתונה שנקלף יחד עם הגוף, הוחלק בחום מעל המגע ודק ביותר מתחת לימות, שהם הפתחים; 94%–96% הנותרים הם החומר העמוק של חלק A (הערכה מתמונת הקליפה הקודמת, שיש לחשב מחדש). רצף החשיפה כתוב על הירח כשלושה אזורים קונצנטריים; המכתשים שומרים על גודלם והקטבים אוספים אותם; קרום הצד הרחוק נעשה צפוף יותר ועשיר יותר בברזל עם העומק — תחזיות המועברות למאמרים 11, 6 ו-7 עם המבחנים שלהן. זמן הכשל, היציבות התלת-ממדית, משוואת המצב העמוקה ומאזן האנרגיה הם ארבע הדרישות שהמנגנון מציב לעצמו; כל אחת מנוסחת ב-D.18 עם המבחן שלה.
- מה שיש בידינו עכשיו הוא מנגנון המנוסח כמערכת תנאים, לכל אחד המבחן שלו. חלק E עוקב אחר החלק היחיד של המערכת שלא עזב: האגס.

חלק E — מה שהאגס השאיר בכדור הארץ

הבעיה

האגס נאסף בחזרה לתוך כדור הארץ, ונשא עמו את רוב הברזל שעלה לתוכו. היכן עמד האגס ביחס לכדור הארץ העמוק כפי שהוא נראה היום, ומה עשה לפני כדור הארץ בזמן שעמד?

הירח עזב; האגס נשאר. מכיוון שהוא נמצא כולו בתוך קו הקורוטציה, הוא לא יכול היה ללכת אחרי הירח אל המסלול, האגס לא עזב עם הירח; לאחר השחרור ההתמיינות אספה אותו בחזרה אל חצי כדור הארץ שנשא אותו, לאורך עשרות עד מאות מיליוני שנים. המסה שלו לא עזבה את כדור הארץ; היא עברה מגבוה בחוץ אל עמוק בפנים. מסה גדולה כל כך — תשע עד שתיים-עשרה מסות ירחיות מן החומר של כדור הארץ עצמו, עשיר בברזל בעומק — נאספה אל האזור שמתחת לאוקיינוס השקט, שם עמד האגס. חלק זה מתעד היכן נמצא בסיס האגס ביחס למה שהדימויים הסייסמיים מראים היום בתחתית האזור הזה, ומה עשה האגס לפני כדור הארץ בזמן שעמד. טבעם של האזורים העמוקים נשאר פתוח.

E.1 שני אזורים בבסיס המעטפת

כדור הארץ העמוק מצולם בטומוגרפיה סייסמית. רעידות אדמה שולחות גלים דרך כל הכוכב; כשהם נרשמים באלפי תחנות, זמני ההגעה שלהם מגלים היכן הגלים נעו מהר יותר או לאט יותר מן הממוצע, בדומה לסריקת CT רפואית הבונה תמונה של הגוף מנתיבים רבים של קרני רנטגן. גלי גזירה (גלי S), המנערים את החומר הצידה, רגישים במיוחד לטמפרטורה ולהרכב: הם מאטים במקום שבו החומר חם יותר, רך יותר או בעל הרכב שונה.

הדימויים הסייסמי מוצא שני אזורים בגודל של יבשת, שבהם מהירות גלי הגזירה נמוכה, בבסיס המעטפת של כדור הארץ: אחד מתחת לאפריקה ואחד מתחת לאוקיינוס השקט, וכל אחד מהם משתרע לרוחב אלפי קילומטרים ועד כ-1,000 ק"מ מעל גבול הליבה-מעטפת [11]. אלה הם LLVP (אזור איטי גדול במעטפת התחתונה; large low-velocity provinces): אזורים גדולים של המעטפת התחתונה ביותר, ממש מעל הליבה, שבהם גלי גזירה נעים לאט. רוב התצפיות תומכות בטבע תרמו-כימי — חומר השונה בהרכבו מן המעטפת שסביבו, ולא רק בטמפרטורה — ושני האזורים עומדים מתחת לפלומות ולנקודות החמות של הלוחות שמעליהם: הם לוחצים על המעטפת העליונה גם היום. פלומה היא עמוד של חומר חם העולה מעומק המעטפת; במקום שבו היא מגיעה לפני השטח היא מזינה נקודה חמה, כמו הרי הגעש של Hawai'i.

הם אינם דומים זה לזה. האזור האפריקני מתנשא גבוה יותר מן האזור של האוקיינוס השקט; האזור של האוקיינוס השקט נמוך ורחב יותר, ובשולו, מתחת ל-Hawai'i, נמצא חומר עשיר בברזל במהירות נמוכה במיוחד. אזורים במהירות נמוכה במיוחד (ULVZ) הם כתמים דקים על גבול הליבה-מעטפת, שבהם הגלים הסייסמיים מאטים בחוזקה רבה בהרבה מאשר באזורים הגדולים עצמם; תכולת ברזל גבוהה היא אחד הפירושים שהוצעו להם.

טבעם של האזורים עדיין שנוי במחלוקת. ייתכן, למשל, שהם חומר הקשור לליבה שלא סיים להתמזין, או חומר שעדיין מתמזין לאט מאוד. המאמר הזה אינו מציע להם פירוש; הוא משתמש בהם רק כמפה של האזור שמתחת לאוקיינוס השקט, שם עמד האגס.

E.2 היכן עמד האגס

האגס עמד מעל האזור שמתחת לאוקיינוס השקט. לאחר השחרור ההתמיינות אספה אותו בחזרה אל כדור הארץ: חלקו הכבד — כתשע מסות ירחיות של סימה, הנושאת את רוב הברזל שעלה לתוכה (C.10§) — שקע עמוק אל תוך כדור הארץ מתחת לבסיס האגס; הצד הקדמי שלו נאסף לתוך הפסים של צפון האוקיינוס השקט, והגב שלו לתוך הקשתות של מערב האוקיינוס השקט (מאמר 9, *The Stripes*). סימה הוא החומר הצפוף יותר, העשיר בצורן ובמגנזיום, השוכב מתחת לסיאל הקל; הברזל שנשא הפך אותו לצפוף עוד יותר. השאלה אם חלק כלשהו מן המבנה העמוק שנראה היום מתחת לאוקיינוס השקט קשור לאגס אינה נדונה כאן: המאמר מתעד רק היכן שוכב בסיס האגס ביחס למבנה הזה (E.4§).

E.3 קריאות אחרות של האזורים

לאחרונה הוצע שהאזורים האלה הם שרידי המעטפת של Theia, הגוף שהתנגשותו יצרה את הירח לפי ההסבר המקובל: המעטפת העשירה בברזל שלו הייתה שוקעת לבסיס המעטפת של כדור הארץ ושורדת שם [12]. מחבר ההצעה ציין שמוצא אחר של הירח, בלי Theia, יחייב לשקול מחדש את מוצא האזורים. [14] Edwards קשר את הירח לאזורים מכיוון אחר, עם פיצוץ מעל האזור של האוקיינוס השקט הקדום ששיגר את החומר שלו למסלול. המאמר הנוכחי אינו מציע קריאה משלו. הוא מציין רק שבמודל הזה האגס היה החומר של כדור הארץ עצמו, ודבר זר לא נכנס למעטפת של כדור הארץ.

E.4 מיקום הבסיס

מדידה אחת קושרת את האגס לכדור הארץ העמוק: מיקום הבסיס שלו.

- **מיקום — נמדד.** המודל מציב את בסיס האגס סמוך ל-Kiritimati (כ- 1.9° צפון, 157.5° מערב, B.1§). הנקודה הזאת שוכבת מעל האזור של האוקיינוס השקט, בתוך גבולו במודלים שפורסמו של המעטפת התחתונה ביותר, בכל מודל שנבדק (הטבלה ואיור 14): כל חמשת המודלים הטומוגרפיים של ניתוח האשכולות של Cottaar ו-[17] Lekic מצביעים על הנקודה כאיטית, והיא שוכבת עמוק בתוך קו המתאר של 1% — הן של [18] SMEAN והן של [19] SMEAN2 בעומק 2,800 ק"מ, יותר מ-1,200 ק"מ מן השוליים הקרובים ביותר. הבסיס עומד מעל החלק הצפוני של האזור, כ-1,500 ק"מ צפונית למרכזו; ה-ULVZ הגדול ליד [20] Hawaii נמצא כ-1,100 ק"מ מן הנקודה, כשהמרחק נמדד על גבול הליבה-מעטפת.

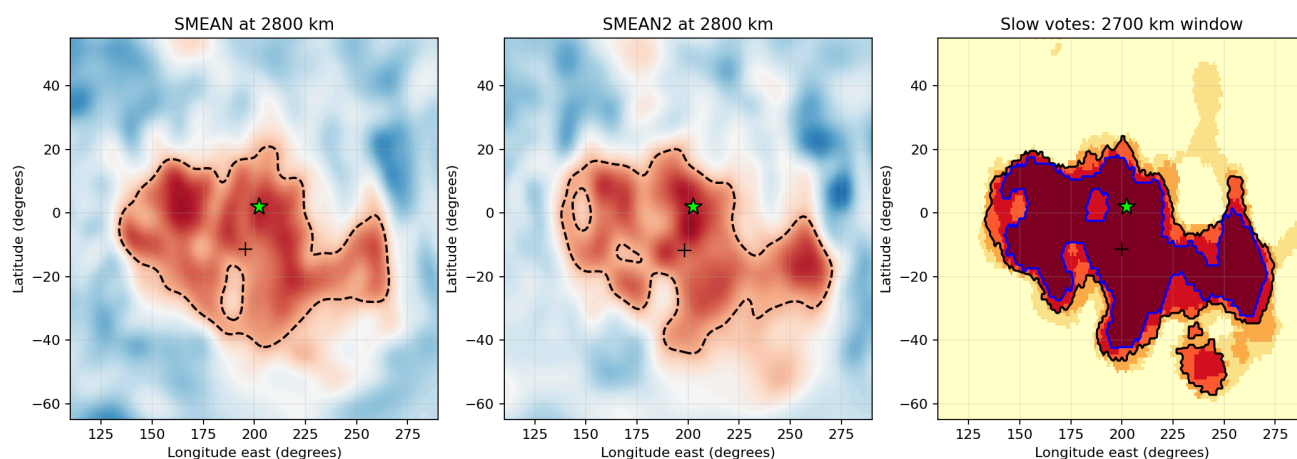
שלושת המדדים שבהם משתמשת המדידה צריכים מילה כל אחד. קבוצות מחקר שונות בונות מודלים טומוגרפיים שונים מנתונים ומשיטות שונים, והם אינם מסכימים בכל פרט. *מפות הצבעה* הופכות את אי ההסכמה הזאת לספירה: Cottaar ו-[17] Lekic מיינו כל נקודה של המעטפת התחתונה ביותר, בכל אחד מחמישה מודלים, לאיטית, ניטרלית או מהירה, וההצבעה היא מספר המודלים הקוראים לנקודה איטית; חמישה מתוך חמישה פירושו שכל מודל מציב אותה בתוך אזור איטי. SMEAN ו-SMEAN2 הם ממוצעים של כמה מודלים של גלי גזירה; δV_S היא הסטייה של מהירות גלי הגזירה מן הממוצע באותו עומק, כך ש- 2.25% — פירושו שהגלים שם נעים לאט ב- 2.25% מן הממוצע. קו המתאר של 1% — הוא המתאר המקובל של האזור, ונקודה הנמצאת עמוק בתוכו, כשהשוליים רחוקים יותר מאלף קילומטרים, אינה מקרה גבולי.

קו האורך 202.5° מזרח שבטבלה זהה ל- 157.5° מערב, בכתיבה על סקאלה מזרחה מ- 0° עד 360° . הבסיס הוא הקצה המזרחי של טביעת הרגל של האגס. הקריאה המוקדמת יותר של אזור המקור, שמרכזה סמוך ל- 25° צפון, 165° מזרח, היא הגב של האגס, שנטה מערבה וצפונה (B.1§). מאמר 9 (*The Stripes*) ממקם את חותם הקצה בין שני כיפופים של הפסים של צפון האוקיינוס השקט, ברוחב 3,360 ק"מ ובמרכז 9.3° צפון, 169.3° מזרח, כ-3,760 ק"מ מערבית לבסיס (גרסה קודמת נתנה 3,770 ק"מ), ואת גב האגס — בקשתות של מערב האוקיינוס השקט. סעיף זה נוגע בבסיס, שמתחתיו שקע החלק הכבד.

ממד ב-1.9° צפון, 202.5° מזרח	מודל, עומק	תוצאה
הצבעות "איטי"	Lekic-I Cottaar, 2,850–2,550 ק"מ	5 מתוך 5 איטיים
בתוך קו המתאר של 1%–	SMEAN, 2,800 ק"מ	בתוך; $\delta V_S = -2.25\%$; השוליים במרחק 1,584 ק"מ
בתוך קו המתאר של 1%–	SMEAN2, 2,800 ק"מ	בתוך; $\delta V_S = -2.36\%$; השוליים במרחק 1,229 ק"מ
מרכז האזור האיטי	שלושה מודלים	11.1°–11.8° דרום, 195.7°–200.0° מזרח; 1,476–1,657 ק"מ לכיוון דרום-דרום-מערב
ה-ULVZ של Hawaii, מרכז	Romanowicz-I Cottaar, בסיס המעטפת	17.5° צפון, 192.5° מזרח; 2,050 ק"מ על פני השטח, 1,120 ק"מ על גבול הליבה-מעטפת

השורות הירוקות הן שלושת המדדים שמציבים את הנקודה בתוך האזור; שתי השורות האחרונות ממקמות אותה בתוך האזור. הנקודה שוכבת בחלק הצפוני של האזור, 1,657–1,476 ק"מ צפון-צפון-מזרחית למרכזו, ששלושת המודלים מסכימים למקם מדרום למשווה. ה-ULVZ של Hawaii רחוק 2,050 ק"מ על פני השטח, אך רק 1,120 ק"מ על גבול הליבה-מעטפת: אותה זווית בין שתי נקודות פורשת מרחק קצר יותר על גבול הליבה-מעטפת, שרדיוסו רק כמחצית מרדיוס כדור הארץ.

איור 14 מראה את המדידה על המפות עצמן: הנקודה הסמוכה ל-Kiritimati נופלת בתוך קו המתאר המקווקו של 1%– של שני המודלים הממוצעים, ועל הגוון הכהה ביותר של מפת ההצבעה, שם כל חמשת המודלים מסכימים.



איור 14. בסיס האגס מעל האזור של האוקיינוס השקט. הנקודה הסמוכה ל-Kiritimati (כוכב ירוק, 1.9° צפון, 202.5° מזרח) על SMEAN ועל SMEAN2 בעומק 2,800 ק"מ (מקווקו: קו המתאר של 1%–) ועל הצבעות "איטי" של Lekic-I Cottaar בחלון של 2,700 ק"מ (כהה: חמישה מתוך חמישה מודלים איטיים). הצלב מסמן את מרכז האזור האיטי. המרחקים הם מרחקי מעגל גדול על פני כדור הארץ.

- **איזוטופים בבזלות של פלומות.** במודל הזה האגס היה החומר של כדור הארץ עצמו, ודבר זר לא נכנס למעטפת; לכן פלומות העולות מכל אחד מן האזורים צפויות לשאת את החתימה האיזוטופית של כדור הארץ עצמו, בלי רכיב זר לכדור הארץ. איזוטופים הם גרסאות של יסוד הנבדלות מעט במסתן; היחסים ביניהם שונים מגוף לגוף במערכת השמש, ולכן הם משמשים טביעת אצבע של המוצא.

E.5 ליבת כדור הארץ בזמן האגס

האגס גם פעל על כדור הארץ בזמן שעמד. השאלה של סעיף זה היא מה עשתה מסה מחוברת גדולה כל כך לפני העמוק של כדור הארץ, והאם תיעוד של כך יכול היה לשרוד.

בשלב המוקדם הוא כמעט לא הייתה לכדור הארץ ליבה. זה היה כדור ארץ שמתחיל להתהוות: השכבות שלו עוד לא היו מוגדרות, היו רק סימנים ראשונים של יצירת שכבות, ובמרכזו שכנה טרום-ליבה רחבה — חומר שבעתיד יהיה ליבה, שעוד לא נפרד ממה שסביבו. כשהגוף הזה הסתובב והתחיל למשוך את האגס החוצה, טרום-הליבה הרחבה קיבלה את אותה צורה: אגס פנימי מורחב, הנמשך לעבר האגס החיצוני.

בזמן שהאגס עמד, שבע עד שתיים-עשרה מסות ירחיות מן החומר של כדור הארץ עצמו עמדו בצד אחד של כדור הארץ, בין פני השטח שלו לבין כ-15,400 ק"מ ממרכזו (גרסה קודמת נתנה 16,000 ק"מ) (C.7§ נותן 8.8–12.1 מסות ירחיות ברגע השחרור, עבור בסיסים של 9,000–11,000 ק"מ). הכבידה שלהן מגיעה עד המרכז. טרום-הליבה צפופה מן החומר שסביבה, ובשדה הפועל על כל הפנים היא נמשכת לעבר האגס, כמו משקולת בתוך נזול, עד שהמשיכה של החומר שהיא דוחקת מחזיקה אותה. מכיוון שהאגס הוא חלק מכדור הארץ ולא גוף נפרד, כדור הארץ כולו אינו נע לעברו; השדה שלו פועל על הפנים כשדה קבוע.

הטבלה נותנת את השדות במרכז כדור הארץ בתחילת האגס וברגע השחרור, עבור הבסיס הצר ביותר והרחב ביותר. השדה נטו הוא המשיכה של האגס ועוד המשיכה הקטנה של הירח, פחות האיבר הצנטריפוגלי: כדור הארץ, האגס והירח מסתובבים יחד סביב מרכז המסה המשותף שלהם, שנמצא מחוץ למרכז כדור הארץ לכיוון האגס, והסיבוב הזה נותן למרכז כדור הארץ תאוצה המכוונת הרחק מן הצד הזה. הצבע מעמיק לאורך הטבלה ככל שהאגס גדל, והמשיכה שלו גדלה איתו.

שלב, בסיס האגס	השדה של האגס (m/s ²)	השדה של הירח	צנטריפוגלי, סביב מרכז המסה המשותף	שדה נטו
התחלה, 9,000 ק"מ	0.430	0.029	-0.082	0.378
התחלה, 11,000 ק"מ	0.496	0.029	-0.091	0.434
שחרור, 9,000 ק"מ	0.466	0.016	-0.090	0.393
שחרור, 11,000 ק"מ	0.613	0.016	-0.112	0.517

אין כאן הזהה בקילומטרים, ואי אפשר לתת אחת. היא הייתה דורשת ליבה מוגדרת, מעטפת מוגדרת סביבה וקשיחות ביניהן, ובשלב ההוא אף אחד מאלה לא היה קיים. הטבלה נותנת רק את המשיכה ואת כיוונה. אנו מציעים שטרום-הליבה הפנימית נמתחה לעבר האגס כל עוד האגס עמד — חלק גדול מכ-600 מיליון השנים שמתחילת הבליטה ועד השחרור לפני 3.873 מיליארד שנה. הכיוון נשען על הנחה אחת: שהגירעון שנותר במקור העמוק מולא ופוזר על ידי החומר שסביבו בזמן שההזנה עלתה; גירעון שנשאר במקומו ליד המרכז היה דוחף לכיוון ההפוך.

אחרי השחרור ההתמיינות אספה את האגס בחזרה אל כדור הארץ, בהדרגה, לאורך עשרות עד מאות מיליוני שנים, והחומר שלו התפשט על חצי כדור הארץ שאליו היה מחובר. כשכבה לא מפוצה הוא היה ממשיך למשוך את הפנים לעבר החצי הזה — השדה של שכבה כזאת במרכז, $GM/2R^2$, הוא 0.53–0.73 m/s². כאן M היא מסת השכבה ו- R רדיוס כדור הארץ; הביטוי הוא המשיכה, במרכז כדור, של שכבה דקה המכסה חצי אחד של פני השטח שלו. אבל שכבה קלה המונחת על מעטפת נוזלית אינה נשארת לא מפוצה: המעטפת שמתחתיה מסתגלת, והשדה הרחוק של עומס מפוצה קטן. פיצוי הוא התהליך שבו המעטפת זורמת מתחת לעומס שנוסף על פני השטח עד שהעמוד שמתחת לכל נקודה שוקל שוב אותו דבר, כמו רפסודה השוקעת במים עד שהיא

דוחקת את משקלה; המסה שנוספה מאוזנת אז על ידי גירעון מתחתיה, ומנקודת המבט של המרכז השניים כמעט מתקזים. אז טרום-הליבה הפנימית נרגעת וחוזרת לעבר המרכז. בקיצור: בזמן שהאגס עמד טרום-הליבה נמתחה לעברו, ואחרי שהאגס נאסף בחזרה היא נרגעה.

המבחן מנוסח כדרישה וכפתח למחקר (מאמר 12): מבנה חצי-כדורי של הליבה המיושר עם הצד של האגס, ואסימטריית המזרח-מערב של הליבה הפנימית היא המועמדת הראשונה. גלים סייסמיים החוצים את הליבה הפנימית המוצקה נעים במהירויות שונות בחצייה המזרחי ובחצייה המערבי; אם טרום-הליבה נמתחה לעבר האגס בזמן שהליבה נוצרה, הליבה הגדלה אולי תיעדה את הצד. המבחן חלש אם הליבה הפנימית צעירה בהרבה מן הירח, כי ליבה פנימית מאוחרת לא תישא את התיעוד.

מה שיש בידינו עכשיו הוא גורלו המלא של האגס: לאחר השחרור ההתמיינות אספה אותו בחזרה אל כדור הארץ, וחלקו הכבד שקע מתחת לבסיסו, באזור שהאזורים העמוקים שלו נראים היום וטבעם נשאר פתוח; הבסיס נמצא בתוך האזור של האוקיינוס השקט בכל מודל שנבדק; בזמן שהאגס עמד טרום-הליבה הרחבה נמתחה לעברו, ואחרי שנאסף בחזרה היא נרגעה.

עבודה נוספת — פתחים למחקר

חלקים A–C מגדירים את הקלטים לחישובים שעדיין יש לבצע. הרשימה שלהלן מזהה עבודה שקבוצות מחקר אחרות מצוידות לבצע. כל פריט מציין חישוב שהמאמר הזה מכין אך אינו מבצע, ואת הסעיף שאת תוצאתו הוא יחליף או יבחן.

1. **סימולציה תלת-ממדית של הגוף המחובר.** המצב ההתחלתי — גוף בעל המסה הירחית ב-1,300 ק"ג/מ"ק, היושב על קצה של 6,000 ק"מ, על גוף אם ברדיוס נפחי של 6,517 ק"מ המסתובב ב-5.5 שעות, ומוזן דרך מגע בבסיס בלחץ מקור של 150 ג'יגה-פסקל — מוגדר במלואו. הרצה בשיטת חלקיקים מוחלקים (SPH) או באלמנטים סופיים תבחן יחד את יציבות הכיפה, את רצף ההתעגלות של C.4§ ואת מרווח השחרור של C.5§. שתי השיטות מחלקות את הגוף לאלמנטים קטנים רבים ועוקבות אחר הכוחות ביניהם צעד אחר צעד, וזה מה שצורה חופשית ומשתנה מסוג זה דורשת.
2. **משוואת המצב של הנתך העמוק.** ההזנה דורשת נתך קל מ-3,864 ק"ג/מ"ק לאורך העלייה (A.10§). ניסויים בנוזלים סיליקטיים מימיים ופחמתיים ב-50–150 ג'יגה-פסקל, ודינמיקה מולקולרית מעקרונית ראשוניים של אותם הרכבים, יכריעו אם הדרישה מתקיימת ובאיזו תכולת חומרים נדיפים. משוואת המצב היא הקשר בין לחץ, טמפרטורה וצפיפות של חומר; מים ופחמן דו-חמצני המומסים בנתך מורידים את צפיפותו.
3. **שחרור האנרגיה של גוף האם.** ההרמה עולה בסדר גודל של 10^{30} (J.12) מודל של ההתפתחות התרמית של כדור ארץ שבו הברזל שוקע, והוא מתכווץ ומתקרר תחת אטמוספירת אדים, ייתן את הקצב שבו האנרגיה הזאת נעשית זמינה, ומכאן את משך ההזנה.
4. **הדבקות Stefan של שכבה סיליקטית חמה.** מרווח השחרור $\Delta r \simeq 2d_0$ (C.5§) משתמש בשכבה ניוטונית. עבודה מעבדתית ונומרית על ההיפרדות של שני גופים המחוברים בשכבה מותכת חלקית — קוויטציה, היצרות, המעבר מכשל צמיג לכשל שביר — תקבע את טווח המרווח ואת זמן השחרור. הדבקות Stefan היא ההתנגדות של שכבה צמיגה דקה להפרדת שני המשטחים שהיא מחברת, הכוח המורגש כשמפרידים שני לוחות שביניהם דבש; שכבה ניוטונית היא שכבה שההתנגדות שלה פשוט פרופורציונית לקצב שבו היא מעוותת.
5. **הקרום המרובד בצד הרחוק.** הצד הרחוק נבנה בשכבות של חומר ממין יותר ויותר (B.7§). ההרכב של הפסגות המרכזיות מול עומק המקור שלהן, בנפרד לצד הרחוק ולצד הקרוב, ימדוד את המפל, ומודל של הבנייה יחזה את המדרגות שלו.
6. **ליבת כדור הארץ בזמן האגס.** מודל הידרוסטטי תלת-ממדי של כדור הארץ הצעיר, שעוד לא התרבה לשכבות, עם האגס עומד ואחרי שנאסף בחזרה, שבו עוקבים אחר הגירעון במקור, יראה כיצד טרום-הליבה הרחבה נמתחה לעבר האגס (E.5§) וכיצד נרגעה אחר כך; המבנה החצי-כדורי של הליבה הפנימית הוא התייעוד הראשון להשוואה.
7. **קרום הצד הקרוב.** הסייאל של הטבעת של הכיפה התחתונה נקלף יחד עם הגוף; מעל המגע הוא הותר והוסר, לפני השטח הוחלקו על ידי חום וכבידה (C.4a§). מודל תרמי של המגע ייתן את עומק ההתכה הזאת, ומכאן את עובי הקרום מעל המגע לעומת העובי בחגורה.
8. **סיווג הימות לפי אזור חשיפה.** הפתחים לא התנהגו כולם באותו אופן (B.5§). Imbrium לא השליכה חומר, וגם Serenitatis לא, מלבד אולי פצפוצים קלים. רוב הפתחים האחרים, מתוך 34–36 הימות של המחבר, כן השליכו חומר: אלה של הצד הרחוק בשלבים מוקדמים, עד שנאטמו, ואלה של השוליים לאורך זמן רב. ההבדל בין ימות המגע שלא השליכו לבין הימות שהשליכו ניתן לבדיקה בהרכב, בשדות המכתשים המשניים ובעובי הקרום מתחת לכל אגן (מאמר R8, 11).

זמינות הקוד

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

- Batchelor, G. K. (1967). *An Introduction to Fluid Dynamics*. Cambridge University Press. Source [1] for the momentum-balance equations, fluid stresses and viscous flow; the numerical estimates and .their application to LEF are derived in this paper
- Hauri, E. H., Weinreich, T., Saal, A. E., Rutherford, M. C., & Van Orman, J. A. (2011). High Pre- [2] Eruptive Water Contents Preserved in Lunar Melt Inclusions. *Science*, **333**, 213–215. <https://doi.org/10.1126/science.1204626>
- Goldblatt, C., Robinson, T. D., Zahnle, K. J., & Crisp, D. (2013). Low simulated radiation limit for [3] runaway greenhouse climates. *Nature Geoscience*, **6**, 661–667. <https://doi.org/10.1038/ngeo1892>
- Wieczorek, M. A., et al. (2013). The Crust of the Moon as Seen by GRAIL. *Science*, **339**, 671–675. [4] <https://doi.org/10.1126/science.1231530>
- Weber, R. C., Lin, P.-Y., Garnero, E. J., Williams, Q., & Lognonné, P. (2011). Seismic Detection of [5] the Lunar Core. *Science*, **331**, 309–312. <https://doi.org/10.1126/science.1199375>
- Turcotte, D. L., & Schubert, G. (2002). *Geodynamics*, second edition. Cambridge University Press. [6] Source for the rheological framework, viscous relaxation of topography and thin-film (Stefan) adhesion .used in Parts B and C
- Mortimer, N., et al. (2017). Zealandia: Earth's Hidden Continent. *GSA Today*, 27(3–4), 27–35. DOI [7] [10.1130/GSATG321A.1](https://doi.org/10.1130/GSATG321A.1). Cited for the caution that the Pacific region is not free of continental crust
- Poincaré, H. (1885). Sur l'équilibre d'une masse fluide animée d'un mouvement de rotation. *Acta* [8] *Mathematica*, **7**
- Walter, S. A. (2023). The Poincaré pear and Poincaré–Darwin fission theory in astrophysics, 1885– [9] 1901. *Philosophia Scientiae*, **27**(3), 159–187. doi:10.4000/philosophiascientiae.4178
- Cartan, É. (1928). Sur la stabilité ordinaire des ellipsoïdes de Jacobi. In J. C. Fields (Ed.), [10] *Proceedings of the International Mathematical Congress, Toronto 1924*
- Garnero, E. J., McNamara, A. K., & Shim, S.-H. (2016). Continent-sized anomalous zones with [11] low seismic velocity at the base of Earth's mantle. *Nature Geoscience*, **9**(7), 481–489
- Yuan, Q., Li, M., Desch, S. J., et al. (2023). Moon-forming impactor as a source of Earth's basal [12] mantle anomalies. *Nature*, **623**, 95–99
- de Meijer, R. J., Anisichkin, V. F., & van Westrenen, W. (2013). Forming the Moon from terrestrial [13] silicate-rich material. *Chemical Geology*, **345**, 40–49. doi:10.1016/j.chemgeo.2012.12.015
- Edwards, M. R. (2026; online 2025). Explosive lunar fission above a large low-velocity province. [14] *Acta Geochimica*, **45**, 15–29. doi:10.1007/s11631-025-00834-2
- Lock, S. J., & Stewart, S. T. (2017). The structure of terrestrial bodies: Impact heating, corotation [15] limits, and synestias. *Journal of Geophysical Research: Planets*, **122**, 950–982. [doi:10.1002/2016JE005239](https://doi.org/10.1002/2016JE005239)

- Denton, C. A., Asphaug, E., Emsenhuber, A., & Melikyan, R. (2025). Capture of an ancient [16]
Charon around Pluto. *Nature Geoscience*, **18**, 37–43. doi:10.1038/s41561-024-01612-0
- הפניות פנימיות בתוך סדרת LEF — כתבי היד של המחבר:** 1, *The Model* — הסיפור של המודל; 2, *LEF*
— *Mechanism in Principle* — הקורטציה, האגס, הקיזוז, תקציב התנע הזוויתי וגבולות רוע; 4, *The Orbit* —
ההתפתחות המסלולית אחרי השחרור; 5, *The Craters*; 6, *The Maria* — החומר החוזר והמכתשים; 7, *The*
— *Poles* — ההתעגלות של הגוף המחובר; 8, *The*; 9, *South Pole–Aitken*; 10, *The Stripes*; 11, *Mars*;
— *Requirements* — המבחנים התצפיתיים, כולל סיווג האגנים לפי אזור חשיפה. ההפניות לכתבי היד אינן אישור
חיצוני לתוצאות המודל.
- Cottaar, S., & Lekic, V. (2016). Morphology of seismically slow lower-mantle structures. [17]
Geophysical Journal International, **207**, 1122–1136. doi:10.1093/gji/ggw324
- Becker, T. W., & Boschi, L. (2002). A comparison of tomographic and geodynamic mantle models. [18]
Geochemistry, Geophysics, Geosystems, **3**, 1003. doi:10.1029/2001GC000168. (SMEAN.)
- Jackson, M. G., Konter, J. G., & Becker, T. W. (2017). Primordial helium entrained by the hottest [19]
mantle plumes. *Nature*, **542**, 340–343. doi:10.1038/nature21023. (SMEAN2.)
- Cottaar, S., & Romanowicz, B. (2012). An unusually large ULVZ at the base of the mantle near [20]
Hawaii. *Earth and Planetary Science Letters*, **355–356**, 213–222; corrected table, 390, 327 (2014)
- Hut, P. (1981). Tidal evolution in close binary systems. *Astronomy and Astrophysics*, **99**, 126– [21]
140. מקור משוואות הגאות של פיגור זמן קבוע ששימשו בחיפוש מרחק השחרור של C.5a§.

מחבר, נתונים ושיטות

זוהר דוראן (Zohar Duran), חוקר עצמאי, רמלה, ישראל. ORCID: 0009-0005-3194-9387.

המאמר אינו מציג מערך נתונים תצפיתי כמותי חדש; מיקום המקור והפירוש של הצורה המיוחסים למחבר הם השערות גאומורפולוגיות, ושיטת השחזור שלהן לא הוצגה כאן. הערכות הלחץ, הזרימה וההתקררות ניתנות לשחזור מן הקלטים ומן המשוואות המפורטים כאן. המצבים המצומדים בחלק C מבוססים על החישובים של מאמר 2; השחזור המלא שלהם מחייב גם את פתרון הצורה ואת מאזן התנע הזוויתי המפורטים שם. הספרות התצפיתית משמשת כאילוץ לבדיקת המודל. מספר הספרות בתוצאות אינו הערכה של אי-הוודאות הפיזיקלית, הנשלטת בעיקר על ידי ההנחות על המבנה ועל החומר.

נספח A — מקורות, הנחות וחידוש

נספח זה ממיין את רכיבי המאמר לפי מעמדם. חלקם פיזיקה סטנדרטית הלקוחה מספרי לימוד; חלקם תצפיות קודמות המשמשות כאילוצים; חלקם חישובים שנעשו כאן; וחלקם רכיבים של המודל שמוצעים וחייבים להיבדק. הטבלה נקראת שורה אחר שורה: העמודה האמצעית נותנת את הסיווג של כל רכיב, והעמודה השמאלית את המקור שלו ואת התפקיד שהוא ממלא בטיעון. הטעם של המיון הוא שהקורא יוכל לראות מיד אילו חלקים של המאמר נשענים על פיזיקה מבוססת ואילו הם ההצעות של המודל עצמו.

רכיב	סיווג	בסיס ותפקיד
כבידה ניוטונית, מאזן תנע ולחץ	פיזיקה סטנדרטית	משוואות המאזן נגזרות בגוף המאמר; מכניקת רצף לפי [1].
זרימה צמיגה במעבר גלילי	פיזיקה סטנדרטית	פתרון [1] Poiseuille; היישום שלו למעבר הוא קירוב מפורש.
התקררות והתמצקות	הערכת מאזן חום	משוואה (7); הקלטים התרמיים הם קלטי רגישות שאומצו, ולא מדידות של המערכת הקדומה.
מים בתכלילים, קרום הירח וליבתו	תצפיות קודמות	[2], [4], [5]; הן אינן אימות של מסלול היווצרות מסוים.
גבול הקרינה באטמוספרת אדים	עבודה קודמת	[3]; אסור להעתיק את התנאים שלה לכל המערכת המחוברת.
הזנה מחוברת מאזור מקור מרוכז	רכיב של המודל	מבנה שיש לבדוק; אינו נגזר מתצפית יחידה או מההתמיינות עצמה.
צירוף של לחץ, זרימה, עומס ומסת המעבר	חישוב בעבודה זו	משוואות (25)–(29) וסף הרדיוס; מצביע על גבול הקירוב, ואינו פתרון תלת-ממדי.
הגוף על הקצה וכלל החלקים	חישוב בעבודה זו	חלק B: גובה הכיפה העליונה והצפיפות, חלקי שטח הפנים, זוויות האזורים; כלל גאומטרי, ולא פתרון של עיוות.
התנגדות המגע בשחרור	פיזיקה סטנדרטית שיושמה כאן	חוק [6] Stefan; התנגדות קטנה; שחרור כ-210 ק"מ מעבר לקו הקורוטציה ($C.5a\text{\AA} ; \simeq 2d_0$), הגוף נמשך החוצה; מודל של שכבה דקה ניוטונית.
קדימות ביחס לכל מודלי הבנייה הקודמים	לא הוכחה	המאמר אינו טוען להוכחת בלעדיות או לסקירה ממצה של עבודות קודמות.

שני מונחים בטבלה עשויים לדרוש הסבר. פתרון Poiseuille הוא התוצאה הסטנדרטית לזרימה יציבה של נוזל צמיג דרך צינור: ספיקת הזרימה גדלה עם החזקה הרביעית של רדיוס הצינור, ולכן רוחב המעבר חשוב כל כך

בחלק A. חוק Stefan נותן את הכוח הדרוש כדי להפריד שני משטחים המחוברים בשכבה צמיגה דקה; כאן הוא מעריך כמה המגע התנגד — התנגדות קטנה — כשהשחרור כ-210 ק"מ ($\simeq 2d_0$) מעבר לקו הקורוטציה (C.5§).

נספח B — קבועים וגבולות השחזור

נספח זה מציין את הקבועים שבהם נעשה שימוש לאורך המאמר, ומה אפשר — ומה אי אפשר — לשחזר מן המאמר הזה לבדו.

בכל החישובים המספריים כאן: $G = 6.674 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$, שנה = 365.25 ימים ויום = 86,400 שניות. G הוא קבוע הכבידה, הקובע את עוצמת הכבידה בין שתי מסות. בטבלאות הזרימה, הצמיגות, צפיפויות המקטעים, רוחב המעבר, משך ההזנה והחלק הפנימי הם קלטי מבחן: הם נבחרו כדי לסרוק את טווח הבעיה, ואינם ערכים מדודים של כדור הארץ הקדום. הערכים של L_f , k ו- ΔT במשוואת ההתקררות הם הנחות מספריות לצורך ההערכה; לא מוצג עבורם טווח מאומת של החומר הקדום. כאן k הוא מקדם המוליכות התרמית, L_f החום הכמוס המשתחרר כשהנתך מתמצק, ו- ΔT הפרש הטמפרטורות המניע את ההתקררות.

הטבלאות בחלק D נובעות ממצבי שימור התנע הזוויתי והצורה של מאמר 2. כשהמסות, המרחק, המחזור וקו הרוחב נתונים, אפשר לשחזר את הכוח ואת המאמצים ממשוואות (19)–(20), ואת המבחן המשותף ממשוואות (25)–(29). ההוכחה של מחזור הסיבוב עצמו מחייבת את פתרון הצורה ואת מאזן התנע הזוויתי של מאמר 2; היא אינה נובעת ממשוואות הלחץ של מאמר 3. במילים אחרות, המאמר הזה מקבל כנתונים את היממה של 5.77 שעות ואת מרחק השחרור ממאמר 2, וכל מה שהוא מחשב מהם אפשר לבדוק כאן; היממה עצמה נבדקת במאמר 2.

אסור להמיר מספר גבוה של ספרות בטבלה לאי-ודאות קטנה של המודל. אי-הוודאות בצפיפות, בגבולות הזרימה, בצורת החיבור ובמבנה הגוף משמעותית יותר משגיאת העיגול. ערך כמו 10.49 ג'יגה-פסקל מודפס בארבע ספרות כדי שהקורא יוכל לחזור על החישוב במדויק, ולא משום שהמרווח ידוע ברמת דיוק כזאת. התוצאה הסופית של מאמר 3 היא אילוף היתכנות בתוך קירובים שצוינו.