

מאדים

הבוכנה והטבעת

איך מאדים מהיר ותפוח שיגר את דימוס ואת פובוס

חלק א: מה קרה · חלק ב: הראיות · חלק ג: התחזיות

זהר דוראן

חוקר עצמאי, רמלה, ישראל

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

תרגום מלא לעברית של המאמר האנגלי · 23 באוקטובר 2026 · גרסה 3

סביבת העבודה

מאדים הצעיר של מאמר זה אינו מאדים של היום. כל מספר בטבלה שלהלן שייך לו, אלא אם כן נכתב בשורה "היום". לאורך כל המאמר אנו שומרים על כלל אחד: גוף שעוזב כוכב לכת מסתובב נושא איתו את המהירות הצידיית של הנקודה שממנה יצא. בכוכב לכת שמשלים סיבוב אחד בחמש שעות המהירות הצידיית הזאת גדולה, והיא משנה את מה שהר געש מסוגל לעשות.

גודל	ערך	תפקיד
מסת מאדים	$M = 6.4171 \times 10^{23}$ ק"ג	קבועה לאורך כל התהליך; $GM = 42\,828 \text{ km}^3 \text{ s}^{-2}$
רדיוס, היום	ק"מ 3,389.5	נקודת הייחוס
רדיוס, מאדים הצעיר	$R_0 = 1.5 \times 3\,389.5 \approx 5\,084$ ק"מ	הערכת המחבר לכוכב הלכת המורחב, החם והעשיר בחומרים נדיפים (B.1§)
צפיפות ממוצעת, מאדים הצעיר	כ-1,170 ק"ג/מ"ק	נובעת מהמסה ומהרדיוס
אורך היום, מאדים הצעיר	שעות 5	הקלט השני (B.2§)
אורך היום, היום	שעות 24.62	סיבוב סידרי (ביחס לכוכבים)
המהירות הצידיית בקו המשווה	$v_t = \omega R_0 = 1.78$ ק"מ/ש	ניתנת בחינם לכל דבר שעוזב את קו המשווה
הכבידה האפקטיבית בקו המשווה	$1.66 - 0.62 = 1.04$ מ"ש/ש"מ	הכבידה פחות ההשפעה כלפי חוץ של הסיבוב; כ-0.28 מערך של היום, 3.73
רדיוס הקורוטציה, מאדים הצעיר	$7,057 \text{ ק"מ} = 1.39 R_0$	המרחק שבו הסתובבות יחד עם מאדים היא כבר מסלול
רדיוס הקורוטציה, היום	ק"מ 20,428	פובוס בתוכו, דימוס מחוצה לו
פובוס, רדיוס, היום	ק"מ 1,887–1,853	נופל; 3.2 הקפות ביום מאדים
דימוס, רדיוס, היום	ק"מ 1,000–1,471	מתרחק; 0.8 הקפות ביום מאדים
אתר השיגור	Pavonis Mons, 1.48° צפון, 247.04° מזרח; קלדרה ברוחב 47 ק"מ ובעומק של כמעט 5 ק"מ	הצינור הגעשי (D, §1§)
גובה Pavonis, מאדים הצעיר	כ-30 ק"מ (14 ק"מ היום)	הוא השתתף בהתפשטות; הצינור שלו עובר לכל גובהו (B.5§)
השפה הפנימית של הטבעת	קו הקורוטציה, 7,057 ק"מ	מתחתיו האדים הם אטמוספירה המסתובבת עם מאדים (F.1§)

תקציר

פובוס ודימוס מקיפים את מאדים במסלולים כמעט מעגליים מעל קו המשווה שלו, אחד בתוך רדיוס הקורוטציה ואחד מחוצה לו. רדיוס הקורוטציה הוא המרחק שבו גוף שמסתובב עם מאדים כבר נע במהירות של מסלול חופשי. דימוס חלק ומעוגל; פובוס חרוש חריצים ארוכים. שניהם קלים ונקבוביים.

מאדים איבד את רוב המים שלו, ובכל זאת מאגר גדול של מים נוזליים נמצא כיום בעומק 11.5–20 ק"מ מתחת לקרום שלו.

אנו מציעים ששני הירחים נורו מאותו הר געש, Pavonis Mons, על ידי מאדים צעיר שהיה מורחב לפי 1.5 מהרדיוס הנוכחי שלו והשלים סיבוב אחד בחמש שעות. בקו המשווה שלו נשא כל דבר שיצא מהירות צידית חופשית של 1.78 ק"מ/ש', והכבידה האפקטיבית הייתה רבע מזו של היום. מתחת לקרום אטום ומקור החזיק כוכב הלכת מים, חומרים נדיפים וגז. Pavonis התנשא אז לגובה של כ-30 ק"מ, ואדים שנשאו שברי סלע קדחו צינור לכל גובהו. כמו בשפופרת משחה, שבה בועת אוויר כלואה פולטת לפתע טיפה, הגז הכלוא דחף פקק רך של קרום מבסיס הצינור הזה אל ראשו, כפי שבוכנה נדחפת לאורך צילינדר, בתוך פחות מדקה. בעלייתו דרך אטמוספירת אדים צפופה שהסתובבה עם כוכב הלכת, הפקק נישא איתה בסיבובה, ונוזק למהירות כלפי חוץ של 1.3–1.5 ק"מ/ש' בלבד כדי להגיע אל הטבעת, ול-1.9–2.4 ק"מ/ש' בלי העזרה הזאת. דימוס היה הפקק הראשון, קטן וקל; פובוס היה השני, גדול וקשה יותר.

פקק מגיע אל הטבעת, מעט מעבר לקו הקורוטציה שב-7,057 ק"מ, בלי כל המהירות הצידית הדרושה לו כדי להישאר שם. המהירות החסרה באה מטבעת שמאדים בנה מן האדים שלו עצמו זמן רב לפני כן. מתחת לקו הסתובבו האדים עם כוכב הלכת כאטמוספירה; בקו, שבו הסתובבות יחד עם מאדים היא כבר מסלול, הם עזבו את האטמוספירה, התעבו לגבישי קרח ולאבק, ויצרו טבעת. גוף שחוצה את הטבעת נגרר קדימה אל עבר מהירות הטבעת: הוא משיג את מסלולו, מעגלי ומשווני, ואותו חיכוך עצמו שוחק אותו. מעבר לקו הקורוטציה דחפה אחר כך הגאות של מאדים הצעיר, הרך והמהיר, כל ירח כלפי חוץ. דימוס נורה ראשון ועבר את המקום הסופי של הקו, 20,428 ק"מ, לפני שהקו הגיע לשם; הוא שהה זמן רב בטבעת ונשחק עד שהוחלק, בעיקר בטבעת החיצונית הגושית בסוף הטיפוס שלו. פובוס, שנגרר על דפנות הצינור, נבלם: הוא הגיע רק אל השוליים הדקים והגזיים של טבעת דועכת, נחרט בלי שהוחלק, ושמר על החריצים שלו. הקו, שנע כלפי חוץ ככל שמאדים האט, השיג אותו סמוך ל-19,000 ק"מ, ומאז הוא נופל.

החלק הפנימי של הטבעת נפל בחזרה על מאדים כאבק; השאר התאדה אל החלל, והמים שמעולם לא יצאו נשארו כלואים מתחת לקרום האטום. המסה והגז שעזבו את מאדים נשאו איתם את הסיבוב שלו, וכוכב הלכת האט והתכווץ עד למצבו הנוכחי.

חלק I מספר את רצף האירועים הזה. חלק II מציג את העדויות שנותרו: הצינור של Pavonis Mons, שני הפנים של הירחים, מסלוליהם, והמים. חלק III נותן תחזיות מפורטות, כל אחת עם הערך שלה, המכשיר שימדוד אותה, המועד, ומה שההסבר המקובל צופה באותו מקום — ובהן הדגימות מפובוס שמשימת MMX (Martian Moons eXploration) אמורה להחזיר בשנת 2031.

מה המאמר מציג

הר געש אחד, שתי יריות, טבעת אחת. מאדים מהיר, מורחב ועשיר במים ירה שני פקקי קרום מצינור אחד ב-Pavonis Mons באמצעות גז כלוא. טבעת של אדים מעובים השלימה את מסלוליהם ושחקה את הראשון שבהם; הגאות דחפה את שניהם כלפי חוץ. דימוס, הראשון, ששהה זמן רב בטבעת, חלק, מעוגל, קטן יותר משהיה כשיצא, ונמצא במסלול מעגלי מעבר לקו. פובוס, השני, שנבלם בצינור, פגש רק את השוליים הפנימיים הדקים של טבעת דועכת: הוא נחרט בידי גז ולא הוחלק בידי מים, שמר על החריצים ועל קמטי ההתכווצות שלו, נלכד בידי הקו הנע והחל לחזור.

מה ההסבר דורש — מנוסח כאן פעם אחת, ומרוכז בחלק O:

- מאדים צעיר שרדיוסו כפי 1.5 מהרדיוס של היום ויומו 5 שעות, ואובדן מאוחר יותר של כ-92% מהסיבוב שלו (H, O§).
- Pavonis בגובה של כ-30 ק"מ, צינור שנקדח לכל גובהו בידי אדים ושברי סלע, ופקק רך שאוטם אותו; גז כלוא בלחץ של 0.5–0.9 ג'יגה-פסקל המניע את הפקק במעלה הצינור בתוך פחות מדקה, ודפנות שעומדות בלחץ הזה למשך הזמן הזה (C§). זה הצעד הקריטי.
- מאדים צעיר רך, שמפזר אנרגיה פי 8 עד 20 יותר מהיום במשך חצי מיליארד עד מיליארד שנים (G.2§).
- אטמוספרת אדים צפופה המסתובבת עם מאדים מתחת לקו הקורוטציה, ומעליו טבעת של אדים מעובים, שנבנתה בידי מאדים לפני היריות, ומסוגלת לתת לכל גוף את המהירות הצידיית שעדיין חסרה לו: מאחוזים ספורים ועד כמחצית ממסתו בצימוד מושלם, ויותר בפועל (E, F§). ההסבר עומד או נופל עם הטבעת.
- הסבר לספקטרום הכהה, בעל המראה הקדום, של שני הירחים במונחים של חומר מאדימי ששונה בידי מים ובידי החלל.

חלק א — מה קרה

A החידה

A.1 שני ירחים משני צדי קו אחד

פובוס ודימוס קטנים, כהים וקלים. קוטרו של פובוס כ-22 ק"מ ושל דימוס כ-12 ק"מ; הצפיפות הכוללת שלהם, 1,853–1,887 ו-1,471 ק"ג/מ"ק, פירושה ששליש עד מחצית מנפחו של כל גוף הם חלל ריק (Pätzold et al. 2025; NASA/JPL Solar System Dynamics). שניהם מקיפים את מאדים כמעט בדיוק מעל קו המשווה שלו, במסלולים כמעט מעגליים. פובוס, במרחק 9,375 ק"מ ממרכז מאדים, משלים הקפה ב-7.65 שעות, שלוש פעמים בכל יום מאדימי; דימוס, במרחק 23,463 ק"מ, משלים הקפה ב-30.3 שעות.

ביניהם עובר רדיוס הקורטוציה, 20,428 ק"מ — המרחק שבו גוף שמקיף את מאדים נע בקצב הסיבוב של כוכב הלכת עצמו (המרחק שבו גוף שמסתובב עם הכוכב כבר נע במהירות של מסלול חופשי). בתוך הקו ירח מקדים את כוכב הלכת, והגאות שהוא מעורר בו מעכבת אותו: פובוס יורד בספירלה. מחוץ לקו הגאות מושכת את הירח קדימה: דימוס מתרחק לאט. כל הסבר לירחים חייב להעמיד את פובוס בתוך ואת דימוס מחוצה לו.

A.2 שני פנים

שני הירחים אינם נראים דומים. דימוס חלק: המכתשים שלו רדודים ושחוקים, וקווי המתאר שלו מעוגלים. פובוס מחוספס: חריצים ארוכים ומקבילים חוצים אותו, שרשראות של גומות נמשכות לאורך החריצים, והשקע Stickney, שקוטרו 9 ק"מ, נפתח בצד הקדמי שלו (Thomas et al. 1979; Basilevsky et al. 2014). הסבר למוצא הירחים צריך לומר מדוע שני גופים של אותו כוכב לכת נושאים פני שטח שונים כל כך.

A.3 המים של מאדים

פעם זרמו על מאדים נהרות והיו בו אגמים. האטמוספירה שלו כיום מועשרת במימן כבד פי שישה עד שבעה בערך ביחס לאוקיינוסים של כדור הארץ — סימן לאובדן ממושך של מים לחלל; מאדים הצעיר החזיק לפחות כמות השקולה לשכבה כלל-כוכבית בעומק 137 מ' (Villanueva et al. 2015). ועם זאת, המד-סיימי של הנחתת InSight מצא שהקרום האמצעי שמתחתיה, בעומק 11.5 עד 20 ק"מ, מוסבר בצורה הטובה ביותר בחומר שנקבובי מלאים מים נוזליים — כמות שאם היא נכונה לכל כוכב הלכת, שקולה לשכבה כלל-כוכבית בעומק 2–1 ק"מ (Wright, Manga & Panning 2024). מאדים איבד הרבה מן המים שלו ושמר הרבה מהם. הסבר לירחים שמערב מים צריך לומר לאן הלך כל חלק.

A.4 ההסברים המקובלים

כיום נדונים שלושה מקורות אפשריים. **לכידה** של שני אסטרואידים קטנים מתאימה לצבע הכהה אבל לא למסלולים: גוף שנלכד מגיע במסלול נטוי ואקסצנטרי, ולא הוכח שאפשר להפוך שני מסלולים כאלה למעגלים משווניים. **פגיעת ענק** במאדים מעיפה דסקה של שברים, שממנה מצטברים הירחים; דסקה מתיישבת במישור המשווה ומסבירה היטב את המסלולים, וזהו ההסבר המוביל (Rosenblatt et al. 2016; Hyodo et al. 2017; Canup & Salmon 2018). **מחזורי טבעת-ירח** מאפשרים לירחים ליפול, להתפרק לטבעות ולהיווצר מחדש (Hesselbrock & Minton 2017). בשלושת ההסברים, הפנים השונים של שני הירחים מוסברים בנפרד: בגאות, בחומר שנזרק מ-Stickney או בפגיעות מאוחרות (Hurford et al. 2016; Ramsley & Head 2019).

היום: הירחים הצטברו משברים שהעיף גוף זר; לפנים שלהם יש סיבות נפרדות. **כאן:** הירחים הם פקקים של קרום מאדימי שנורו מצינור געשי אחד בידי גז כלוא, וקיבלו את מסלוליהם ואת פניהם מטבעת אחת שמאדים בנה מן הקיטור שלו עצמו.

B מאדים הצעיר

B.1 מוגדל בחצי

כוכב לכת צעיר וחם, מלא בחומרים נדיפים, גדול יותר מן הגוף הקר שהוא הופך אליו. אנו מניחים שרדיוסו של מאדים הצעיר היה פי 1.5 מרדיוסו כיום, $R_0 \approx 5\,084$ ק"מ. מסתו היא מסת מאדים של היום, ולכן הצפיפות הממוצעת שלו הייתה

$$\bar{\rho} = \frac{3M}{4\pi R_0^3} \approx 1\,170 \text{ kg m}^{-3},$$

כ-0.3 מן הצפיפות של היום, 3,934 ק"ג/מ"ק. זהו כוכב הלכת כגוף חם ותפוח של התכה, גז ומים, מתחת(1) לקרום שהחל להתקרר ולהיאטם.

B.2 יום של חמש שעות

מאדים הצעיר השלים סיבוב אחד בחמש שעות, $\omega = 2\pi / (5 \text{ h}) = 3.49 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$. נקודה על קו המשווה שלו נעה הצידה במהירות

$$v_t = \omega R_0 \approx 1.78 \text{ km s}^{-1}.$$

המהירות הזאת ניתנת בחינם לכל מה שעוזב את קו המשווה. גוף שמזרק מכוכב הלכת אינו יוצא ממנוחה: הוא(2) יוצא עם מהירות הקרקע שמתחתיו, כמו כדור שמשחררים מקרוסלה מהירה ועף קדימה והחוצה בבת אחת.

B.3 רבע מן המשקל

בקו המשווה המוגדל הייתה הכבידה $GM/R_0^2 = 1.66$ מ"ש², והסיבוב דחף החוצה בתאוצה $\omega^2 R_0 = 0.62$ מ"ש². מה שהחזיק גוף למטה היה ההפרש,

$$g_{\text{eff}} = \frac{GM}{R_0^2} - \omega^2 R_0 \approx 1.04 \text{ m s}^{-2},$$

כ-28% מן הערך של היום, 3.73 מ"ש². פקק של קרום על קו המשווה של מאדים הצעיר שקל מעט יותר(3) מרבע ממה שהיה שוקל היום.

B.4 הקו קרוב לקרקע

רדיוס הקורוטציה של מאדים זה היה

$$r_{\text{co}} = \left(\frac{GM}{\omega^2} \right)^{1/3} \approx 7\,057 \text{ km} = 1.39 R_0,$$

פחות מ-2,000 ק"מ מעל פני השטח שלו. היום הקו עומד 17,000 ק"מ מעל הקרקע.(4)

B.5 הר געש גבוה יותר

Pavonis Mons מתנשא כיום כ-14 ק"מ מעל פני השטח הממוצעים של מאדים. על מאדים המורחב הוא עמד גבוה יותר. הוא השתתף בהתפשטות של כוכב הלכת, וזו לבדה מביאה אותו לכ-21 ק"מ, והפסגה שלו — כיפה תפוחה מגז ומהתכה מעל צינור פעיל — עמדה גבוה עוד יותר: אנו מניחים כ-30 ק"מ. לגובה יש השפעה קטנה

על השיגור עצמו — בפסגה המהירות הצידיית היא 1.785 ק"מ/ש' והכבידה האפקטיבית 1.01 מ'ש"2 — אבל הוא חשוב לצינור, שעובר לכל גובהו של הר הגעש (C.4§). כשמאדים התכווץ, הר הגעש התכווץ יחד איתו.

גודל	היום	מאדים הצעיר	שינוי
רדיוס, ק"מ	3,390	5,084	$\times 1.5$
יום, שעות	24.6	5	$\times 0.20$
המהירות הצידיית החופשית בקו המשווה, ק"מ/ש'	0.24	1.78	$\times 7.4$
הכבידה האפקטיבית בקו המשווה, מ'ש"2	3.72	1.04	$\times 0.28$
רדיוס הקורוטציה, ק"מ	20,428	7,057	$\times 0.35$
גובה הקו מעל הקרקע, ק"מ	17,040	1,973	$\times 0.12$
גובה Pavonis Mons, ק"מ	14	כ-30	$\times 2$

טבלה 1. מאדים הצעיר מול מאדים של היום. הצבע מעמיק עם גודל השינוי.

c דחיפת הגז

c.1 שפופרת משחה

הרעיון נולד בבית. כשלוחצים על שפופרת משחה מעט בכל פעם ומרפים בכל פעם, השפופרת שואבת בחזרה בועת אוויר דרך הפייה שלה. בלחיצה הבאה האצבע אינה לוחצת על המשחה אלא על הבועה, שנדחסת כמו קפיץ; כשהבועה מגיעה לפייה היא משתחררת בבת אחת ויורקת בכוח את הטיפה שבקצה. את הטיפה לא זרקה האצבע. אותה זרק גז שנכלא, נדחס ושוחרר.

c.2 כוכב לכת מתחת למכסה

מאדים הצעיר החזיק מים, פחמן דו-חמצני וחומרים נדיפים אחרים בפנים החם שלו, מתחת לקרום שהתקרר מלמעלה ונאטם. גז שעלה מלמטה לא יכול היה לברוח דרך הקרום האטום; הוא הצטבר מתחתיו, בתאים ובצינורות של הרי געש שקצותיהם העליונים קפאו לפקקים. כוכב הלכת היה, בדימוי של השפופרת, מלא בבועות כלואות מתחת למכסה.

c.3 מדוע דחיפה כלואה ולא פיצוץ

פיצוץ געשי שמשחרר את הגז באופן חופשי אינו יכול לזרוק חומר לחלל: הגז מתפשט לכל הכיוונים, ומהירותו מוגבלת במהירות הקול בגז החם, בסדר גודל של 1 ק"מ/ש'. לקיטור ב-K 1,500,

$$c_0 = \sqrt{\frac{\gamma RT}{\mu}} \approx 0.95 \text{ km s}^{-1} \quad \left(\gamma \approx 1.3, \mu = 0.018 \text{ kg mol}^{-1} \right).$$

צינור געשי משנה זאת. כשגז כלוא דוחף פקק לאורך צינור סגור, הצינור פועל כצילינדר והפקק כבוכנה: כל(5) הלחץ פועל על הפקק לכל אורך הקנה, ודבר אינו הולך לאיבוד לצדדים. זה העיקרון של תותח הגז, והגבול שלו הוא המהירות שבה הגז עצמו יכול להתפשט אל חלל ריק,

$$u_{\max} = \frac{2c_0}{\gamma - 1} \approx 6.3 \text{ km s}^{-1},$$

כלומר 6.3 ק"מ/ש' לקיטור ב-K 1,500, 5.7 ק"מ/ש' ב-K 1,200 ו-7.3 ק"מ/ש' ב-K 2,000. מהירויות השיגור(6) שחלק E דורש, 1.3–2.4 ק"מ/ש', נמצאות הרבה מתחת למחצית הגבול הזה. הדחיפה הכלואה אינה שוברת את

הפיזיקה של הגז; היא מנצלת את כולה.

C.4 המחזור שבונה פקק

זהו המחזור של התפרצות וולקנית, שנראה כיום בהרי געש כמו Soufrière Hills (Clarke et al. 2015). הגז נמלט, והצינור מתפנה. בהפוגה שאחר כך, המאגמה שעומדת בצינור מאבדת את הגז שלה ומתקררת; הצינור פתוח אל השמיים שמעליו, וחלקו העליון מתקשה לפקק. לחץ חלש מלמטה אינו יכול להזיז את הפקק. הפקק ממשיך להתקרר ולהתחזק בזמן שהגז מצטבר מתחתיו ולחצו עולה, עד שהפקק נכנע ונדחף כלפי מעלה מלמטה, כמו שמים נדחפים החוצה מגייר. כל מחזור בונה פקק חדש. הפוגה ארוכה יותר נותנת פקק שהתקרר לעומק רב יותר: גדול יותר וקשה יותר.

כל שחרור גם מעמיק את הצינור. קיטור שיוצא במהירות גבוהה נושא איתו שברי סלע, והתערובת קודחת ומרחיבה את הצינור שהיא עוברת בו, כפי שהתפרצויות עתירות גז על כדור הארץ קדחו את צינורות הקימברליט ואת הדיאטרמות של הרי געש מסוג מאר. במשך מחזורים רבים נקדח הצינור של Pavonis לכל גובהו של הר הגעש, כ-30 ק"מ, מן התא שבבסיסו ועד הפסגה.

C.5 פקק רך אוטם

הפקק אינו גוש של חומר קר. הוא חומר חמים, צמיגי ועשיר במים: תחת עומס איטי הוא זורם, נלחץ אל דפנות הצינור וממלא כל סדק, כמו פקק גומי שאוטם בקבוק; תחת עומס פתאומי הוא נע כגוף אחד. לכן הוא אינו זקוק לחוזק כדי להחזיק את הגז: הוא מחזיק את הגז משום שהוא נלחץ אל הדפנות, ולא משום שהוא עמיד בפני שבירה. הירחים עצמם מראים שהיו רכים. השקעים העתיקים ביותר שלהם, ובהם Stickney, לא נחפרו כקערות אלא התקפלו פנימה (K.3, §LS), ושליש עד מחצית מכל גוף הם החלל הריק של קצף שקפא (J.3§).

הפקק נוצר בבסיס הצינור, כ-30 ק"מ מתחת לפסגה, במקום שבו ההתכה העולה פגשה את הדפנות הקרות יותר. שם נשארה החזית שלו חמימה ורכה: אילו עמד בראש הצינור הפתוח, היה מתייבש, מתקרר ומתקשה באוויר, ולא יכול היה להתקפל תחת מכה. הוא נשאר רך עד הירייה, וזמן רב אחריה: קליפה בעובי קילומטר זקוקה לעשרות אלפי שנים כדי להתקרר.

C.6 כמה חזק הגז צריך לדחוף, ומה מחזיק אותו

פקק באורך L_p ובצפיפות ρ_p , שמואץ למהירות v לאורך צינור באורך L_b , זקוק ללחץ ממוצע

$$\bar{p} \approx \frac{\rho_p v^2 L_p}{2L_b} + \rho_p g_{\text{eff}} L_p,$$

האיבר הראשון כדי להאיץ אותו, השני כדי לשאת את משקלו. המשקל קטן: על מאדים הצעיר הוא מוסיף (7) כ-0.02 ג'יגה-פסקל. את הלחץ קובעת המהירות, שחלק E גוזר: 1.3–1.5 ק"מ/ש' אם האטמוספירה נושאת את הפקק בסיבובה בזמן שהוא עולה (E.2§), ו-1.9–2.4 ק"מ/ש' אם לא. אנו מניחים לדימוס אורך של 14 ק"מ בצפיפות 1,200 ק"ג/מ"ק, ולפובוס אורך של 18 ק"מ, לאורך הציר הקצר שלו, בצפיפות 1,600 ק"ג/מ"ק.

הצינור	דימוס, נישא בסיבוב	פובוס, נישא בסיבוב	דימוס, מעוף חופשי	פובוס, מעוף חופשי
ק"מ 20	ג'יגה-פסקל 0.96	ג'יגה-פסקל 1.29	ג'יגה-פסקל 2.47	ג'יגה-פסקל 2.64
ק"מ 30	ג'יגה-פסקל 0.65	ג'יגה-פסקל 0.87	ג'יגה-פסקל 1.65	ג'יגה-פסקל 1.77
ק"מ 40	ג'יגה-פסקל 0.49	ג'יגה-פסקל 0.66	ג'יגה-פסקל 1.24	ג'יגה-פסקל 1.33

טבלה 2. לחץ הגז הממוצע מאחורי כל פקק, עבור Pavonis בגובה 30 ק"מ ויום של חמש שעות. "נישא בסיבוב": הפקק עולה כשהוא מסתובב עם האטמוספירה (E.2§); "מעוף חופשי": בלי עזרה מן האטמוספירה. סביב בסיס הצינור החומר שמסביב לוחץ בחזרה ב-0.05–0.10 ג'יגה-פסקל; דופן של צינור תחת לחץ מחזיקה בערך פי שניים מזה, ועוד חוזק החומר עצמו, כ-0.1–0.2 ג'יגה-פסקל. הצבע מעמיק עם הפער בין השניים.

לכן הדפנות צריכות להחזיק 0.5–0.9 ג'יגה-פסקל במשך פחות מדקה — פי שלושה עד חמישה ממה שהחומר שמסביב לבדו לוחץ בחזרה. שלושה דברים סוגרים את הפער. הקרום של מאדים הצעיר התקרר מלמעלה והיה עבה, וחומר קר וצפוף חזק פי כמה בדחיסה מאשר במתיחה. הפקק הרך אוטם את הצינור בזמן שהוא נע, כך שגז שנמלט אל סדק אינו מקדים אותו. והירייה קצרה: סדק צריך להיפתח ולגדול לאורך הדופן לפני שהגז יכול לצאת דרכו, ואילו הדחיפה כולה נמשכת 25–45 שניות. זה השלב שההסבר תלוי בו יותר מכל.

C.7 בתוך הצינור

בתוך הצינור הפקק מסתובב עם מאדים. הסיבוב דוחף אותו החוצה בתאוצה של $0.62 \text{ מ}^2/\text{ש}^2$ והכבידה מושכת אותו בחזרה ב- $1.66 \text{ מ}^2/\text{ש}^2$, כך שהגז פועל נגד תאוצה נטו של $1.04 \text{ מ}^2/\text{ש}^2$ בבסיס ו- $1.01 \text{ מ}^2/\text{ש}^2$ בפסגה, שמוסיפה אחוזים ספורים ללחצים שבטבלה 2. לאורך צינור של 30 ק"מ הפקק מגיע למהירותו בתוך 25–45 שניות, בתאוצה ממוצעת של פי שלושה עד עשרה מכבידת כדור הארץ.

אותו סיבוב לוחץ את הפקק העולה הצידה. גוף שעולה דרך כוכב לכת מסתובב שומר על המהירות הצידי של העומק שממנו יצא, והיא קטנה מזו של הקרקע שמעליו; לכן דופן הצינור חייבת לדחוף אותו קדימה. תאוצת קוריוליס, $2\omega v$, היא $0.9\text{--}1.7 \text{ מ}^2/\text{ש}^2$ במהירויות אלה — בגודל הכבידה האפקטיבית — והיא לוחצת את הפקק אל אחת מדפנות הצינור. פקק ראשון, רך וקל, מחליק לאורך הדופן; פקק שני, גדול וקשה יותר, נגרר עליה, נחרץ לכל אורכו ונבלם (K.1§).

C.8 האנרגיה של ירייה

פקק של דימוס, כ- 2.4×10^{15} ק"ג במהירות $1.5\text{--}2.4$ ק"מ/ש', נושא $2.7\text{--}7.0 \times 10^{21}$ ג'אול; פקק של פובוס, כ- 9.3×10^{15} ק"ג במהירות $1.3\text{--}1.9$ ק"מ/ש', נושא $0.8\text{--}1.7 \times 10^{22}$ ג'אול. קיטור ב-1,500 K מחזיק כ- 3×10^6 ג'אול לכל קילוגרם; ביעילות של 40% הירות צורכות $2\text{--}6 \times 10^{15}$ ו- $0.7\text{--}1.4 \times 10^{16}$ ק"ג קיטור, בערך כמסת הפקק. ביחס למים של מאדים הצעיר, בסדר גודל של 10^{23} ק"ג, כל ירייה מוציאה כעשירית המיליונית מהם.

השלב הקריטי

הירייה היא השלב שההסבר תלוי בו יותר מכל, והרחוק ביותר ממה שהרי געש עושים כיום. על כדור הארץ, גושים של התפרצות וולקנית יוצאים במהירות של מאות מטרים לשנייה; כאן פקק יוצא במהירות של 1.3–2.4 ק"מ/ש'. חמישה דברים יוצרים את ההבדל, וכל אחד מהם מוצג עם המספר שלו: רבע מן המשקל (B.3§); המהירות הצידי החופשית של 1.78 ק"מ/ש' (B.2§); דחיפה כלואה, שמוגבלת ב-6.3 ק"מ/ש' ולא במהירות הקול (C.3§); צינור שנקדח דרך הר געש בגובה של כ-30 ק"מ (B.5, C.4§); ואטמוספירה שנושאת את הפקק העולה בסיבוב יחד עם כוכב הלכת (E.2§). ההסבר ייכשל אם הדפנות של צינור כזה אינן יכולות להחזיק 0.5–0.9 ג'יגה-פסקל במשך פחות מדקה, אם פקק רך אינו יכול לאטום אותו, או אם אין חוסר מסה מתחת לקלדרה של Pavonis (תחזית N.4).

D התותח

D.1 מדוע קו המשווה

גוף שעוזב את מאדים מקו רוחב ϕ מתחיל במסלול שנטוי בזווית ϕ ביחס למשווה. שני הירחים מקיפים בתוך כשתי מעלות ממישור המשווה. אתר שיגור על קו המשווה מציב אותם שם מן הרגע הראשון; אתר רחוק מקו המשווה היה זקוק למשהו שישטח את המסלול אחר כך.

D.2 ארבעה הרי געש, מועמד אחד

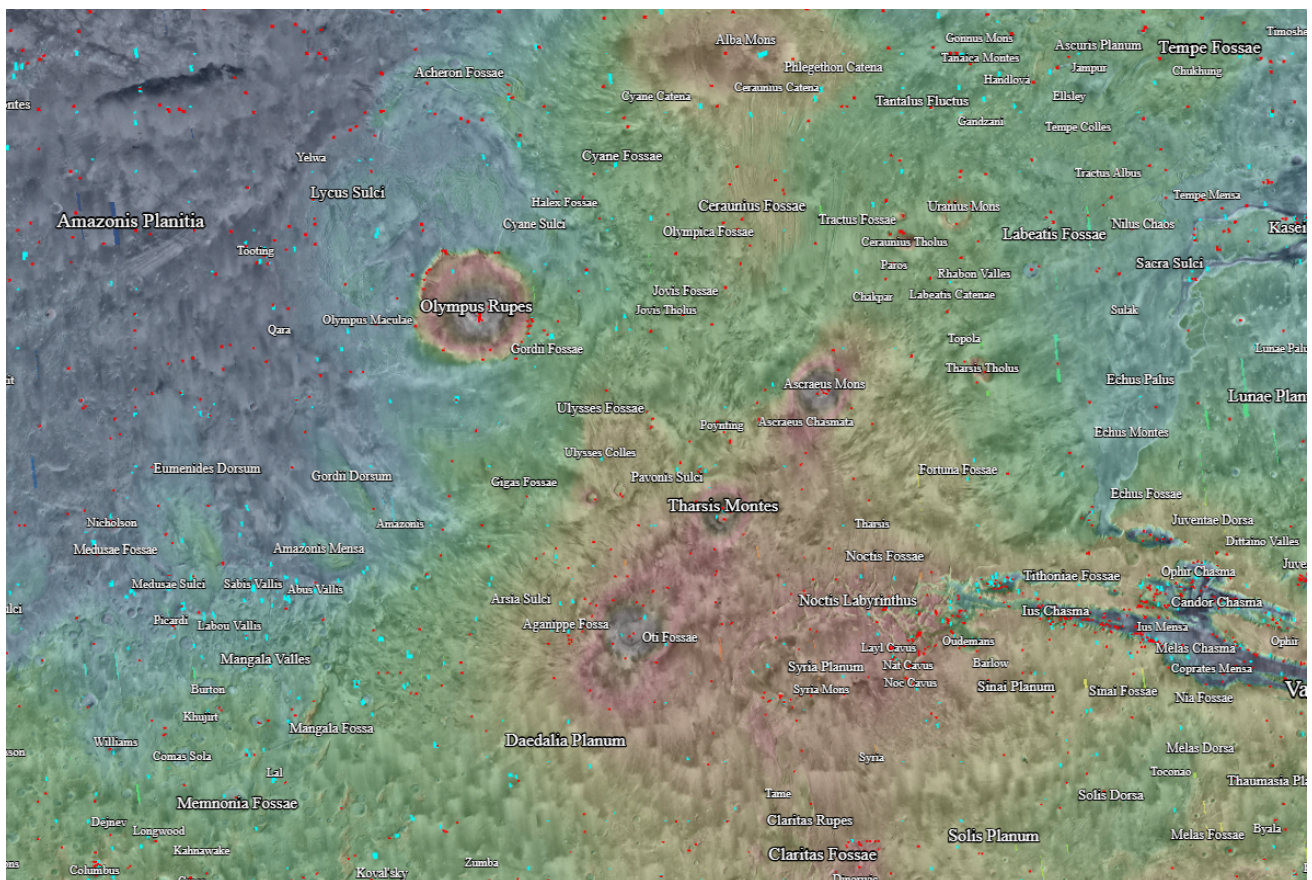
ארבעת הרי הגעש הגדולים של מחוז Tharsis הם Olympus Mons ושלושה הרים על קו אלכסוני: Ascraeus, Arsia Montes. Pavonis Mons ו-Pavonis Mons הוא האמצעי שבהם, ב- 1.48° צפון, 247.04° מזרח (IAU Gazetteer), הקרוב ביותר לקו המשווה מבין הארבעה. הקלדרה שבפסגתו היא בור עגול יחיד ברוחב 47 ק"מ ובעומק של כמעט 5 ק"מ, ולצדו שקע גדול ורדוד יותר שקוטרו כ-90 ק"מ. חלק ב (IS) משווה אותו לשלושת האחרים.

D.3 צינור אחד, שנורה יותר מפעם אחת

Olympus Mons, הר הגעש הגדול ביותר במערכת השמש, נמצא ב- 18.65° צפון; גוף שנורה ממנו היה מתחיל במסלול נטוי בכ- 19° . גז שעולה מתא עמוק הולך בצינור שכבר פתח, וכל עוד הצינור הזה פעיל אין סיבה שהלחץ יבנה יציאה שנייה בהר געש אחר. צינור אחד נורה יותר מפעם אחת. 1.48° Pavonis, מקו המשווה, נותן נטייה התחלתית של כ- 1.5° , קרובה לנטייה של פובוס כיום (G.3S).

D.4 צינור אחד, שני פקקים

שני הירחים יצאו מאותו צינור, זה אחר זה. הפקק הראשון ישב בראש הצינור: קטן, קל ורטוב, החומר הצעיר ביותר והעשיר ביותר בגז, ודחף אותו מלוא הלחץ של התא. הוא יצא בצורה נקייה, בלי להיגרר על הדפנות, ועף גבוה. אחרי שיצא, ההתכה העולה התקררה שוב בצינור הפתוח ואטמה אותו בפקק שני, שגדל במשך זמן ארוך יותר: גדול יותר, יבש יותר וקשה יותר. הגז שהצטבר מתחתיו ירה את פובוס; בעודו נגרר על דפנות הצינור, הוא נחרץ לכל אורכו ונבלם (K.1S).



איור 1. Pavonis Mons, האמצעי מבין שלושת הרי Tharsis Montes, בין Ascraeus Mons מצפון-מזרח ל-Arsia Mons מדרום-מערב, ב- 1.48° צפון, 247.04° מזרח, עם הקלדרה שבפסגתו ברוחב 47 ק"מ. קרדיט: ACT-REACT QuickMap Mars; גובה צבוע של MOLA (NASA/GSFC); מינוח IAU.

E.1 תקציב המהירות

פקק עוזב את הפסגה, $R_1 = R_0 + 30$ ק"מ, עם שתי מהירויות שניצבות זו לזו: המהירות הצידית החופשית של הקרקע, $v_t = \omega R_1 = 1.785$ ק"מ/ש', והמהירות כלפי חוץ שנותן הגז, v_r . במעוף חופשי, האנרגיה והתנע הזוויתי קובעים לאיזה גובה הוא יעלה. המהירות כלפי חוץ שמביאה את שיא המסלול שלו לרדיוס r נובעת מן המשוואה

$$\frac{v_t^2 + v_r^2}{2} - \frac{GM}{R_1} = \frac{1}{2} \left(\frac{R_1 v_t}{r} \right)^2 - \frac{GM}{r},$$

כשהאגף השמאלי הוא האנרגיה בשיגור והאגף הימני הוא האנרגיה בשיא, שם המהירות הצידית ירדה ביחס (8) R_1/r משום שהתנע הזוויתי $R_1 v_t$ נשמר.

E.2 האטמוספירה נושאת את הפקק בסיבובה

הפקק אינו עולה דרך חלל ריק. מתחת לקו הקורוטציה היה מאדים הצעיר עטוף בקיטור שפלט בלי הפסקה: אטמוספירה צפופה וחמה שהסתובבה עם כוכב הלכת (F.1§). גוף שעולה שומר על התנע הזוויתי שלו ומפגר אחרי הגז המסתובב סביבו, שנע מהר יותר ככל שהוא גבוה יותר; הגז לוחץ עליו מאחור ודוחף אותו קדימה. אילו החזיקה האטמוספירה את הפקק העולה בקצב שלה לגמרי, הוא היה מגיע אל הקו כשהוא כבר מסתובב במהירות של מסלול, והמהירות כלפי חוץ הדרושה לו הייתה נקבעת בידי המערכת המסתובבת בלבד,

$$v_r^2 = 2 \left[GM \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{r} \right) - \frac{\omega^2}{2} (r^2 - R_1^2) \right] \quad (r \leq r_{co}),$$

ומעל הקו ממשיך הפקק במעוף חופשי. הפקק כבד והגז קל, ולכן העזרה האמיתית נמצאת בין שני המקרים; (9) טבלה 3 נותנת את שניהם.

ירייה	שיא המסלול, ק"מ	מהירות כלפי חוץ, נישא בסיבוב	מהירות כלפי חוץ, מעוף חופשי	החסר בשיא, נישא / חופשי	המהירות המעגלית שם
פובוס, הירייה שנבלמה, מעט מעבר לקו	7,500	1.32	1.90	0.07 / 1.17	2.39
דימוס, אל תוך הטבעת	10,000	1.50	2.41	0.33 / 1.16	2.07

טבלה 3. מה שהגז צריך לתת, בק"מ/ש', למאדים של חמש שעות, בשיגור מפסגה בגובה 30 ק"מ. כל פקק צריך רק להגיע אל הטבעת; הטבעת והגאות עושות את השאר (F, G§). הירייה השנייה, שנבלמה — פובוס — הייתה החלשה יותר.

E.3 הגובה מושג; המסלול לא

הפקק מגיע אל הטבעת בלי כל המהירות הצידית הדרושה לו כדי להישאר שם. במעוף חופשי דימוס, בשיא מסלולו ב-10,000 ק"מ, נע הצידה ב-0.91 ק"מ/ש', במקום שבו מסלול מעגלי דורש 2.07 ק"מ/ש'. אילו נעזב לנפשו, היה נופל בחזרה לאורך אליפסה שנקודתה הנמוכה נמצאת כ-1,100 ק"מ ממרכז מאדים, עמוק בתוך כוכב הלכת; הוא היה פוגע שוב במאדים בתוך הקפה אחת, בקו אורך אחר, משום שמאדים מסתובב מתחתיו. אילו נישא בסיבוב בידי האטמוספירה, היו חסרים לו רק 0.33 ק"מ/ש' והוא כבר לא היה פוגע בכוכב הלכת, אבל מסלולו עדיין היה אליפסה שחוזרת וטובלת באטמוספירה ומאבדת בה מהירות. בכל מקרה, משהו בשיא המסלול חייב לתת לפקק את המהירות הצידית שחסרה לו, לעגל את מסלולו ולהחזיק אותו מעבר לקו.

F.1 אדים מכל סדק

הטבעת לא נוצרה על ידי הר הגעש, וגם לא נוצרה בזמן היריות. כבר מהשלבים הראשונים של חייו שחרר מאדים הצעיר אדים וחומר דק מכל בקע וסדק של כוכב לכת חם, אטום ומסתובב, ובעוצמה הרבה ביותר סמוך לקו המשווה, שם הסיבוב הקל על הקרום יותר מכול. אדים שעולים מן הקרקע שומרים על המהירות הצידיית של הקרקע, והיא קטנה ממהירות של מסלול: מתחת לקו הקורוטציה הם אינם יכולים להקיף, והם נשארים מעל כוכב הלכת כאטמוספירה, שנתמכת בלחץ שלה עצמה ומסתובבת עם מאדים. בקו, הסתובבות יחד עם מאדים היא כבר מסלול. שם עזבו האדים את האטמוספירה, התקררו והתעבו לגבישי קרח, לטיפות ולאבק דק: טבעת שמתחילה בקו ומתפשטת החוצה. השפה הפנימית שלה נשארה בקו, משום שחומר שהתפשט פנימה נכנס אל האטמוספירה, נבלם בה ונפל בחזרה ככפור וכאבק (H.1§). מעבר לכ-13,000 ק"מ, גבול רוש לקרח סביב מאדים, התקבץ החומר שלה לגושים. הירחים נורו זמן רב אחר כך, אל תוך טבעת שכבר עמדה סביב כוכב הלכת.

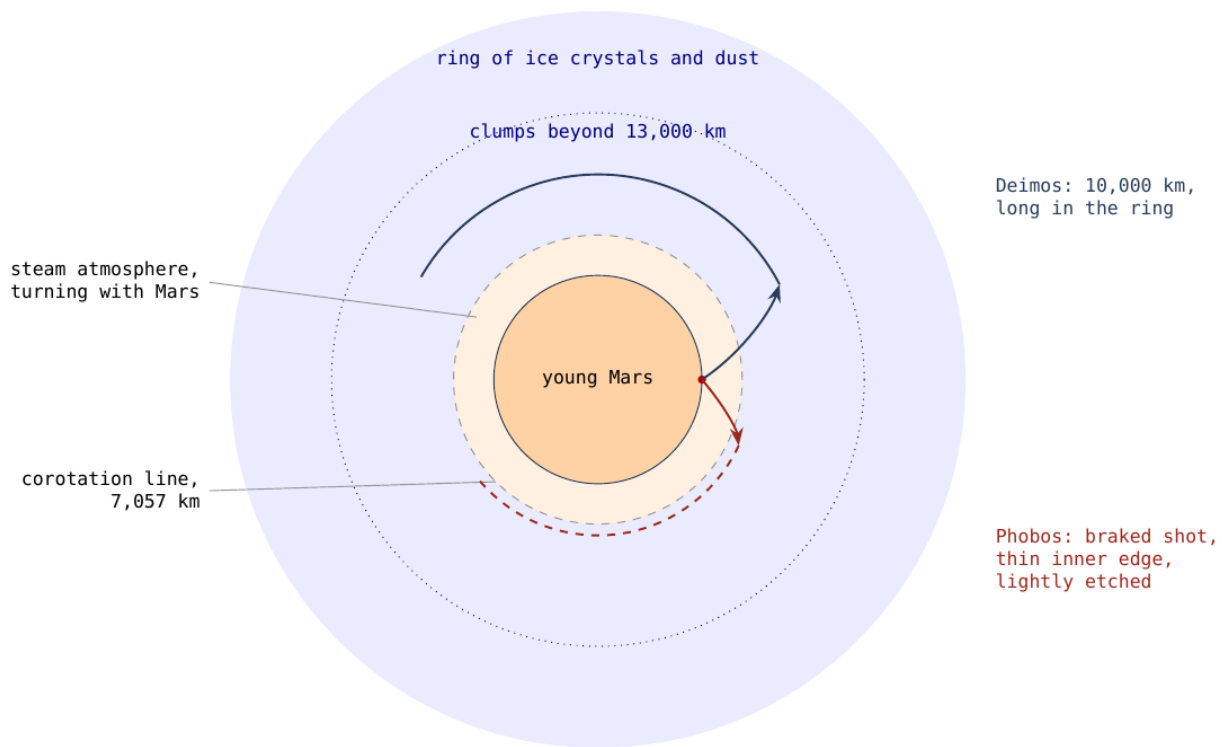
F.2 הטבעת משלימה את המסלול

חלקיקי הטבעת מקיפים את מאדים במהירות של מסלול בגובה שלהם. גוף איטי שחוצה את הטבעת נפגע שוב ושוב מאחור על ידי חומר שנע מהר ממנו, ונגרר קדימה לעבר מהירות הטבעת. זו אותה פיזיקה שבה דסקות של גז ושל פסולת מרסנות את מסלוליהם של גופים שבתוכן. הגרירה פועלת בשלוש דרכים בבת אחת: היא מוסיפה את המהירות הצידיית החסרה, כך שהגוף כבר אינו נופל בחזרה; היא מעגלת את המסלול לעבר מעגל בגובה הטבעת; ומאחר שהטבעת שוכבת במישור המשווה, היא מושכת את המסלול אל המישור הזה.

כדי לתת לגוף את המהירות החסרה לו Δv בשיתוף מושלם של תנע, על הטבעת למסור מסה של לפחות $m \Delta v / v_{\text{ring}}$: מ-0.03 ממסת הגוף, לפובוס שנישא בסיבוב במלואו בידי האטמוספירה, ועד כ-0.56, לדימוס במעוף חופשי (טבלה 3). הצימוד האמיתי פחות ממושלם, ולכן הטבעת צריכה להכיל כמה מונים מזה — בסדר גודל של 10^{15} – 10^{16} ק"ג, חלק קטן מאוד מהמים שכוכב הלכת איבד. הטבעת נושאת עומס במודל: בלעדיה פקק שנורה מפני השטח נופל בחזרה בתוך הקפה אחת, וההסבר כולו נכשל (O§).

F.3 הטבעת מלטשת

החיכוך שנותן לגוף את מסלולו הוא אותו חיכוך ששוחק אותו. כל גרגר קרח שדוחף את הגוף קדימה גם מקלף ממנו שבב. גוף ששווה זמן רב בטבעת גם נישא למסלול מעגלי וגם נשחק עד שהוא חלק: שוליו החדים מוסרים, סדקיו וחריציו נשחקים ונעלמים, מכתשיו מתרככים, וגודלו קטן. גוף שעובר בטבעת במהירות צובר מהירות אך שומר על פניו.



איור 2. הגיאומטריה של ההסבר (הרדיוסים בקנה מידה, המסלולים סכמטיים). הפקק עוזב את Pavonis עם המהירות הצידית של קו המשווה ועם הדחיפה של הגז, ועולה דרך אטמוספירת האדים שמסתובבת עם מאדים מתחת לקו. דימוס עולה אל הטבעת ונשאר בה: הוא נישא למסלול מעגלי, נדחף החוצה על ידי הגאות מעבר לקו, ונשחק בטבעת החיצונית רוויית הגושים. פובוס, שנבלם ונורה בעוצמה חלשה יותר, נכנס אל השפה הפנימית הדקה של טבעת דועכת, מעט מעבר לקו: הוא צובר מהירות מספקת כדי לא ליפול, נחרט רק קלות, ונדחף החוצה עד שהקו הנע משיג אותו. [התוויות באיור: ring of ice crystals and dust — טבעת של גבישי קרח ואבק; clumps beyond 13,000 km — גושים מעבר ל-13,000 ק"מ; young Mars — מאדים הצעיר; steam atmosphere, turning with Mars — אטמוספירת אדים, מסתובבת עם מאדים; corotation line, 7,057 km — קו הקורוטציה, 7,057 ק"מ; Deimos: 10,000 km, long in the ring — דימוס: 10,000 ק"מ, זמן רב בטבעת; Phobos: braked shot, thin inner edge, lightly etched — פובוס: ירייה שנבלמה, השפה הפנימית הדקה, נחרט קלות]

6 דימוס ראשון, פובוס שני

6.1 מדוע דימוס היה ראשון

הירייה הראשונה באה כשהתא שמתחת ל-Pavonis היה בלחץ המלא שלו, והפקק הראשון ישב בראש הצינור: קטן, קל ועשיר במים. הוא יצא בצורה נקייה ונורה סביב מאדים צעיר, חם ומהיר, כשהטבעת במלואה וקו הקורוטציה קרוב לקרקע, ב-7,057 ק"מ. (רדיוס הקורוטציה הוא המרחק שבו גוף שמסתובב עם כוכב הלכת כבר נע במהירות של מסלול חופשי.)

6.2 דימוס: זמן רב בטבעת

דימוס עלה אל הטבעת, כ-10,000 ק"מ מהמרכז, ונשאר בה. הטבעת החזיקה אותו: היא השלימה את מסלולו, עיגלה אותו ומשכה אותו אל מישור המשווה, הרחק מעבר לקו הקורוטציה של אותה תקופה. מעבר לקו ירח מקיף לאט יותר מקצב סיבוב כוכב הלכת; הבליטה שהוא מעלה על כוכב הלכת נישאת לפניו ומושכת אותו קדימה, והוא מתרחק. על מאדים הצעיר — גדול פי 1.5, מסתובב מהר פי חמישה, רך ורטוב — הדחיפה הזאת הייתה חזקה בהרבה מהיום. מאדים שאיבד אנרגיה (פיזור) פי 8 עד 20 יותר מהיום נושא את דימוס מ-10,000 ק"מ ל-23,463 ק"מ בתוך חצי מיליארד עד מיליארד שנים; החלק הראשון, עד 15,000 ק"מ, נמשך רק כ-30–50 מיליון שנים, משום שקרוב לכוכב הלכת הדחיפה חזקה ביותר. דימוס עבר את הקו של היום, 20,428 ק"מ, לפני

שמאדים הואט עד אורך היממה של היום, כך שהקו, שנע החוצה מאחוריו, לא השיג אותו מעולם. כיום אותה דחיפה חלשה: כ-150 ק"מ ב-4.5 מיליארד שנים.

הטבעת גם שחקה אותו. רוב זמן הטיפוס מושקע בחלקו האחרון, סמוך ל-20,000–23,000 ק"מ, שם הדחיפה החלשה ביותר, ושם, מעבר לגבול רוש לקרח, הטבעת הייתה צפופה בגושים. דימוס נשחק בעיקר בסוף הטיפוס שלו. הוא יצא גדול מכפי שהוא כיום, וחלק, ללא חריצים; הוא איבד את שכבותיו החיצוניות ואת שוליו החדים, ויצא מעוגל (J.2§).

6.3 פובוס: ירייה שנבלמה, שפת הטבעת, ומרוץ עם הקו

פובוס היה הפקק השני, גדול יותר, יבש יותר וקשה יותר, והירייה השנייה הייתה החלשה מבין השתיים: בהיגררו לאורך דפנות הצינור הגעשי, הוא נבלם. הגז הניע אותו במהירות של 1.3–1.9 ק"מ/ש' (טבלה 3), והוא עלה רק מעט מעבר לקו, לכ-7,500 ק"מ. שם פגש את הטבעת, אך לא כפי שפגש אותה דימוס: הוא נכנס אל השפה הפנימית הדקה של הטבעת, סמוך לאטמוספירה, ובזמן שהטבעת כבר עברה את שיאה. מאחר שהאטמוספירה נשאה אותו בסיבובה בדרכו למעלה, חסר לו מעט בלבד ממהירות של מסלול, והשפה הדקה נתנה לו בדיוק כך. גז ומים שוחקים משטח בדרכים שונות. מים וקרח מחליקים ומעגלים אותו, כפי שנהר מעגל חלוק אבן. גז שנושא אבק דק אינו מחליק: הוא חורט ומחספס, כפי שהתזת חול עושה זכוכית עמומה. החלק העשיר במים והמעובה של הטבעת היה גבוה יותר, היכן שהיה דימוס; בשפה הדקה והגזית נחרט פובוס קלות, חוספס ולא הוחלק, ושמר על חריצי היציאה שלו, על הקמטים שלו ועל הגומות חדות השוליים שלו. הוא איבד כ-1% מעצמו, שכבה של כ-40 מ'. הגז גם מסתובב סביב מאדים במעגלים אופקיים ומרסן את התנועה מעלה-מטה של מסלול נטוי. פובוס עזב את Pavonis בנטייה של כ-1.5°; הריסון נחלש ככל שהנטייה קטנה, הטבעת דעכה ראשונה, ופובוס שמר על 1.09° — יושר בחלקו, כפי שנשחק בחלקו.

מעבר לקו דחפה הגאות את פובוס החוצה, כפי שדחפה את דימוס. אבל מאדים הואט — הטבעת והחומרים הנדיפים עזבו ונשארו איתם את הסיבוב שלו — והקו נע החוצה יחד איתו. פובוס התרחק לאט יותר מקצב תנועת הקו. הקו השיג אותו סמוך ל-19,000 ק"מ, כשאורך היממה במאדים היה כ-22 שעות, עוד לפני שהגיע למקומו הסופי ב-20,428 ק"מ. מאותו רגע היה פובוס בתוך הקו, ובתוך הקו הגאות גוררת ירח מטה: הוא החל לחזור. קרוב לקו הגאות כמעט נעלמת, ולכן פובוס שהה שם זמן רב, ורוב נפילתו באה מאוחר. דימוס נורה מוקדם יותר, כשהקו הרחק מאחוריו, ועבר את 20,428 ק"מ לפני שהקו הגיע לשם.

הרצת נפילתו לאחור בחיכוך הגאות שנמדד למאדים, $k_2/Q = 1.816 \times 10^{-3}$, מציבה את פובוס ב-18,800 ק"מ לפני 3.5 מיליארד שנים, ב-19,100 ק"מ לפני 3.9 מיליארד שנים וב-19,500 ק"מ לפני 4.5 מיליארד שנים (טבלה 6, חלק II). מאז עיגלה הגאות את מסלולו (האקסצנטריות שלו כיום 0.015) והורידה אותו ל-9,375 ק"מ, שם הוא מקיף 3.2 פעמים בכל יממה מאדימית.

מפגש אחד, שני פרצופים

זמן רב בטבעת: מסלול מלא, מעגלי ומשווני, מעבר לקו; נשחק עד שהוא חלק, מעוגל וקטן יותר. זה דימוס. **נבלם, ובשפה הדקה של טבעת דועכת:** מהירות מספקת כדי לא ליפול, נחרט קלות על ידי גז ולא הוחלק, נדחף החוצה עד שהקו הנע השיג אותו, ומאז בתוך הקו ונופל; החריצים והקמטים נשמרו. זה פובוס.

H.1 הטבעת יוצאת לחלל

הטבעת לא החזיקה מעמד. בחשיפה לאור השמש ולרוח השמש התפרקו המים שבה והמימן שלה נמלט; האיזוטופ הכבד נשאר מאחור באופן מועדף, והאטמוספירה והמים שנותרו על מאדים הועשרו בדאטריום. החלק של הטבעת שבתוך קו הקורטציה נמשך פנימה על ידי הגאות ונפל בחזרה אל מאדים, בעיקר סמוך לקו המשווה, ככפור וכאבק מאדימי; החלק החיצוני והחומרים הנדיפים עזבו. הגאות מוסיפה דחיפה זעירה לכל חלק של הטבעת בכל סיבוב של כוכב הלכת — כ-1,750 סיבובים בשנה על מאדים של חמש שעות — ויחד עם האידוי היא סילקה את הטבעת במשך מאות מיליוני שנים. המשיכה שלה גדלה עם מסת הגוף, ולכן הירחים זזו ראשונים והטבעת עזבה מאוחר יותר. אובדן הטבעת והאטמוספירה הותיר את פני השטח יבשים.

H.2 המים שלא עזבו מעולם

המים שבתוך מאדים לא היו צריכים לחזור פנימה: רובם מעולם לא יצאו. האדים שהזינו את הטבעת והגז שירה את הפקקים היו החלק מן החומרים הנדיפים שמצא דרך החוצה דרך בקעים וצינורות געשיים. השאר נותר אטום מתחת לאותו קרום אטים שהחזיק את הגז בצינור, ונמצא שם עד היום, בנקבוביות של הקרום האמצעי, היכן ש-InSight מצאה אותו.

H.3 מאדים מואט ומתכווץ

מאדים של 5 שעות, ברדיוס של פי 1.5 מהיום, נושא סיבוב (תנע זוויתי) גדול פי 12 בקירוב מזה של מאדים כיום. אילו התכווץ לגודלו הנוכחי בלי לאבד ממנו דבר, היה מסתובב פעם אחת בכשעתיים, ולא ב-24.6 שעות. לכן מאדים איבד כ-92% מהסיבוב שלו. ירי פקק ישר כלפי מעלה אינו בולם כוכב לכת; מה שבולם אותו הוא מסה שעוזבת ונושאת איתה את התנועה הצידיית של כוכב הלכת. גז, אדים ופסולת שעזבו דרך קו הקורטציה נשאו את הסיבוב הרב ביותר לכל קילוגרם: בסדר גודל של 5–20% מהמסה ההתחלתית, רובה חומרים נדיפים, היו צריכים לעזוב בדרך זו כדי שמאדים יואט מחמש שעות ויתכווץ למצבו הנוכחי; הערך הנמוך תקף אם צפיפותו של מאדים הצעיר עלתה לעבר מרכזו. ככל שהסיבוב פחת, הקו נע החוצה, מ-7,057 ק"מ לעבר 20,428 ק"מ של היום: הוא השיג את פובוס סמוך ל-19,000 ק"מ ולא הגיע מעולם אל דימוס.

מאון הסיבוב

הסיבוב (התנע הזוויתי) נשמר עבור מאדים יחד עם כל מה שעזב אותו. ביחידות של הסיבוב של מאדים כיום ($1.9 \times 10^{32} \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-1}$):

פריט	סיבוב
מאדים הצעיר, ברדיוס פי 1.5 מהיום, יממה של 5 שעות	12.2
עזב עם הגז, האדים והטבעת דרך קו הקורטציה (5–20% מהמסה ההתחלתית)	11.2
מאדים כיום	1
נישא על ידי שני הפקקים בשיגור	$< 10^{-6}$
פובוס ודימוס במסלוליהם כיום	$\approx 1.4 \times 10^{-6}$
הוחזר למאדים בנפילתו של פובוס	$\approx 5 \times 10^{-7}$

הירחים הם חלק אחד למיליון מן המאון: שיגורם לא בלם את מאדים, ומסלוליהם לא נזקקו לסיבוב של מאדים. הטבעת נתנה להם את מהירות המסלול שלהם מתוך סיבוב שהיא עצמה לקחה ממאדים, ואיבדה

לחלל הרבה יותר ממה שנתנה. המאזן נסגר על דרישה אחת בלבד — החומרים הנדיפים שעזבו דרך הקו (OS).

חלק ב — הראיות

חלק א סיפר את רצף האירועים. חלק ב מציג את מה שהרצף הזה הותיר אחריו, מקום אחר מקום. כל סעיף מביא את התצפית, את מה שהתיאור של חלק א אומר עליה, ואת המספרים.

I ההר

I.1 הצינור הגעשי של Pavonis

Pavonis Mons מתנשא כ-14 ק"מ מעל הגובה הממוצע של מאדים, על בסיס שרוחבו כ-375 ק"מ. הקלדרה שבפסגתו היא בור עגול יחיד שקוטרו 47 ק"מ ועומקו קרוב ל-5 ק"מ — גליל תלול דפנות ולא קערה רדודה — ומיד מצפון-מזרח לו שקע רחב ורדוד יותר שקוטרו כ-90 ק"מ (USGS/IAU Gazetteer; NASA/JPL). היחס בין העומק לרוחב, כ-0.10, הוא המדד למידה שבה הפסגה היא חבית.

הר געש	קו רוחב	רוחב הקלדרה	עומק הקלדרה	צורה
Pavonis Mons	צפון 1.5°	47 ק"מ	קרוב ל-5 ק"מ	בור עגול עמוק יחיד
Olympus Mons	צפון 18.7°	כ-70 ק"מ (בורות מקוננים)	כ-3 ק"מ	מכלול של בורות חופפים ומדורגים
Arsia Mons	דרום 8.4°	כ-110 ק"מ	טרם נמדד	בור רחב אחד
Ascræus Mons	צפון 11.8°	בורות מקוננים	טרם נמדד	כמה בורות חופפים

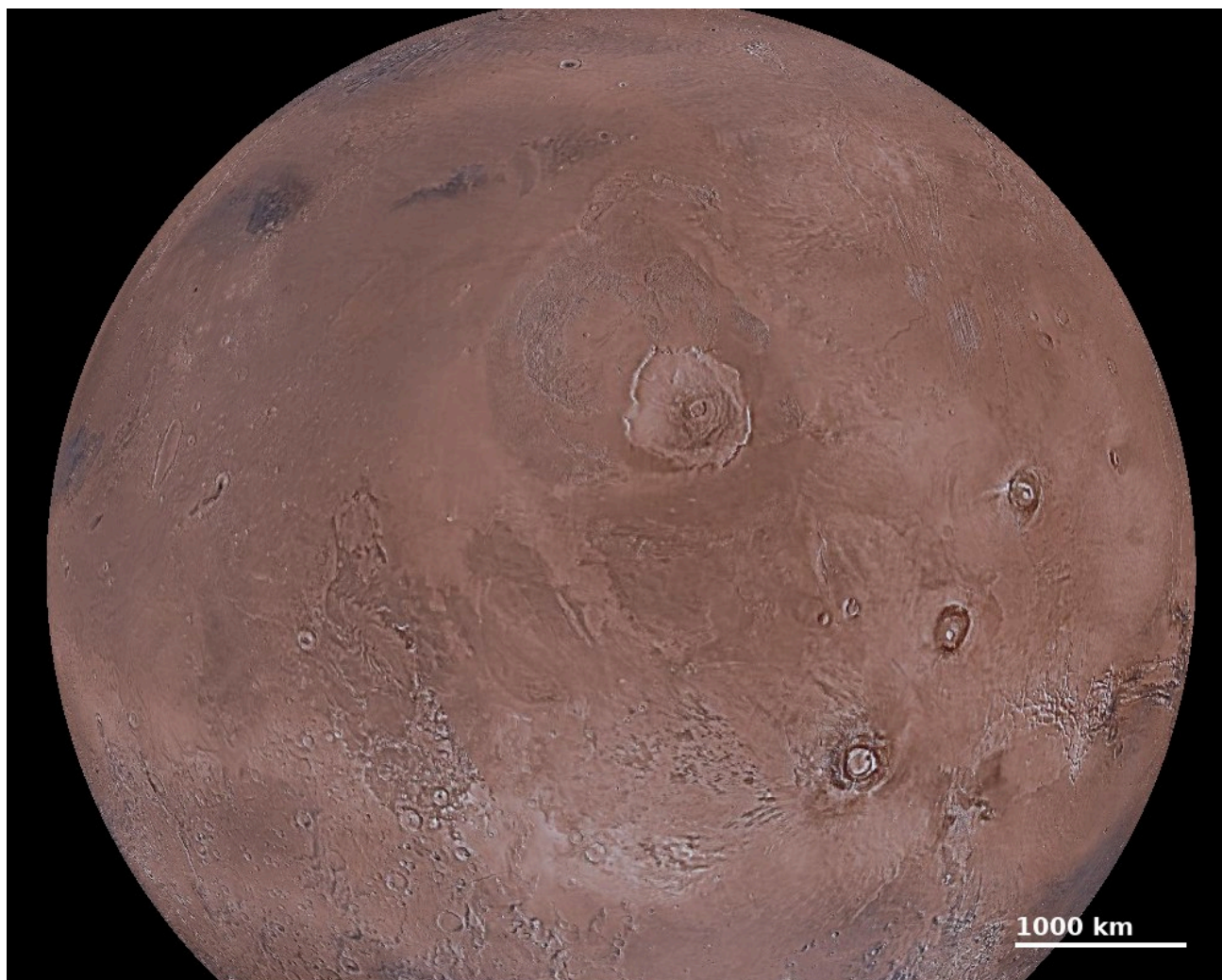
טבלה 4. ארבע הקלדרות של Tharsis. הירוק מסמן את התכונה שהתיאור זקוק לה: על קו המשווה, צרה, עמוקה. את העומקים המסומנים "טרם נמדד" אפשר לקרוא מנתוני הטופוגרפיה של MOLA.

I.2 קנה המידה של הבור

נפח הקלדרה של Pavonis, אם מתייחסים אליה כאל גליל ברוחב 47 ק"מ ובעומק 4.8–5.0 ק"מ, הוא 8,300–8,700 ק"מ מעוקב. שני הירחים מכילים כיום 5,740 וכ-1,000 ק"מ מעוקב, ויחד 6,740 ק"מ מעוקב. הבור הוא בקנה המידה של שני הפקקים. הוא מה שקרס אחרי היריות, ולא תבנית של הפקקים, ולכן אינו קובע את גודלם.

I.3 הקריסה

כאשר פקק יוצא מצינור געשי שנמצא תחת לחץ, התא שמתחתיו מאבד את מה שתמך בתקרתו. התקרה אינה יכולה לעמוד, והיא נופלת פנימה. בור תלול, עמוק ועגול הוא מה שתא מותיר אחריו כאשר תקרתו קורסת אנכית. התיאור צופה שהכבידה מתחת לקלדרה תראה את המסה החסרה של תא שירה (תחזית N.4).



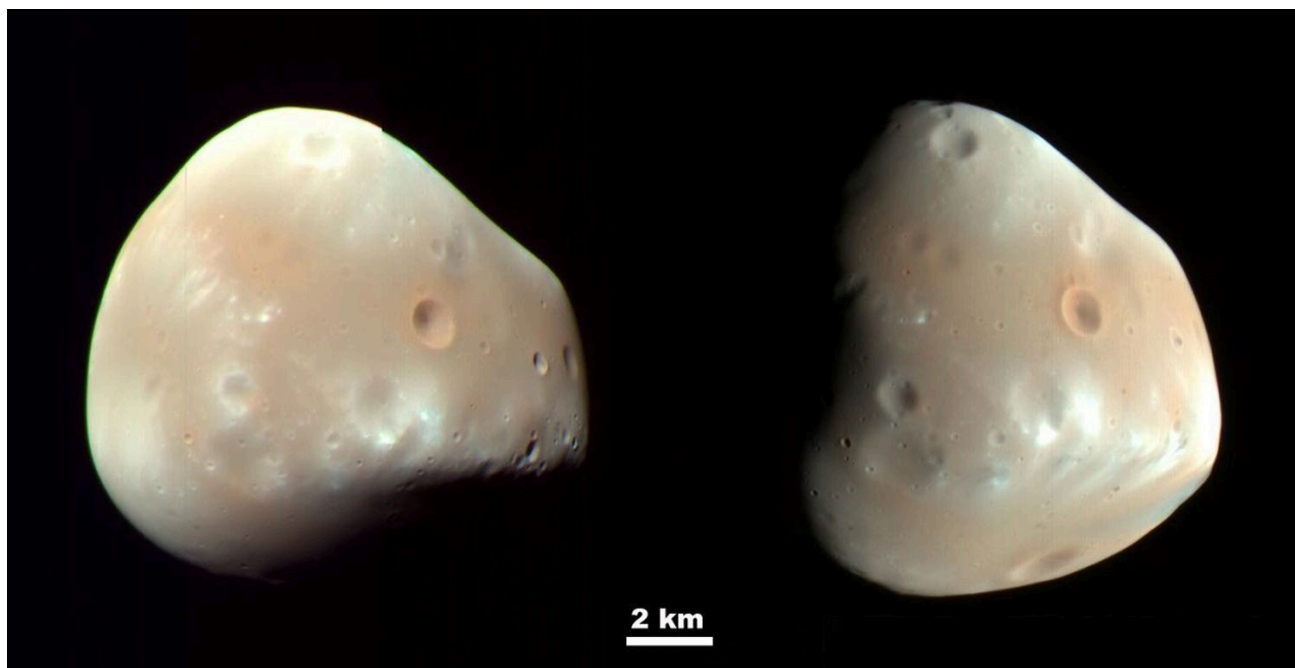
איור 3. מחוז Tharsis, פסיפס צבוע של Viking: Olympus Mons בפינה השמאלית העליונה; Arsia Montes ו-Ascraeus, Pavonis על האלכסון. באמצע, יושב הקרוב ביותר לקו המשווה. קרדיט: ACT-REACT QuickMap Mars; Viking Colorized: Global Mosaic (NASA/JPL/USGS).

נ דימוס

1.1 נ חלק, מעוגל, במסלול מעגלי

דימוס הוא הגוף הקטן החלק ביותר שנצפה עד כה בקרבת מאדים. השקעים שלו רדודים ושחוקים, ואין בו חריצים. במדידה על מודלי הצורה של Ernst et al. (2023), באותה דרך לשני הירחים, לשקעים שרוחבם עולה על 0.7 ק"מ בדימוס יש עומק חציוני של 1.9% מרוחבם, לעומת 5.5% בפובוס; 84% מהם רדודים מ-6% מרוחבם, לעומת 56% בפובוס, ורק 3% עמוקים מ-12%, לעומת 13%. מסלולו כמעט מעגל מושלם (אקסצנטריות 0.0003), קרוב למישור המשווה, והוא נמצא מעבר לרדיוס הקורוטציה — המרחק שבו גוף שמסתובב עם הכוכב כבר נע במהירות של מסלול חופשי. אלה סימניו של גוף ששהה זמן רב בטבעת: הוא הובא אל מסלול מעגלי ומשווני ונשחק על ידי אותם חלקיקים.

דימוס מקיף את מאדים לאט יותר משמאדים מסתובב, וכך היה תמיד: בכ-10,000 ק"מ הוא השלים הקפה ב-8.4 שעות, לעומת יום מאדימי של 5 שעות, כלומר כ-0.6 הקפות ביום; כיום, ב-23,463 ק"מ, הוא משלים הקפה ב-30.3 שעות לעומת 24.6, כלומר 0.8 הקפות ביום. הוא עמד תמיד מעבר לקו. הקו נע החוצה מאחוריו ולא השיג אותו מעולם — ההפך מפובוס (K.58).



איור 4. דימוס, HIRISE (שני מבטים; סרגל קנה מידה 2 ק"מ). גוף חלק ומעוגל, עם מכתשים רדודים ושחוקים וללא חריצים. קרדיט: NASA/JPL-Caltech/University of Arizona (PIA11826).

2.2 גדול יותר כשיצא, אך לא גדול מפובוס

שחיקה מסירה חומר. דימוס יצא מ-Pavonis גדול יותר משהוא כיום, אך לא גדול מפובוס, והוא יצא חלק: הפקק הראשון לא התחכך בדפנות הצינור הגעשי. כמה הוא איבד תלוי בגודלו ביציאה:

קוטר ביציאה	נפח, ק"מ מעוקב	החלק שאבד עד היום	השכבה שנשחקה
ק"מ (היום) 12.4	1,000	—	—
ק"מ 14.0	1,430	30%	ק"מ 0.8
ק"מ 15.6	2,000	50%	ק"מ 1.6
ק"מ 16.8	2,500	60%	ק"מ 2.2
ק"מ 20	4,190	76%	ק"מ 3.8
ק"מ (כמו פובוס) 22.3	5,800	83%	ק"מ 4.9

טבלה 5. דימוס ביציאתו: גדול מהיום, לא גדול מפובוס. הצבע מעמיק עם החלק שנשחק. שורשי הקמטים ששרדו מעדיפים את השורות העליונות, אובדן של 30–60%.

כך גם לגבי הקמטים שלו. דימוס יצא חם ומתופח כמו פובוס, התקרר מבחוץ פנימה, והתקמט כשפנימו התכווץ מתחת לקליפה שהתקשתה (K.2S). דימוס אינו חסר רכסים; חסר בו המספר הגדול שיש לפובוס (Thomas 1979). בטבעת הנקודות הגבוהות נשחקות ראשונות: פסגת רכס בולטת מעל סביבתה ופוגשת את החלקיקים לפני הקרקע שסביבה, ולכן הרכסים הצטמקו מהר יותר מהגוף. בשכבה של כקילומטר נמחקו רוב הקמטים; מה שדימוס מראה כיום הם שורשי הגבוהים שבהם, נמוכים ורחבים. הם נראים קטנים משום שנשחקו יחד עם הגוף, ולא משום שנולדו קטנים.

2.3 קל ורטוב

דימוס הוא הקל מבין השניים, 1,471 ק"ג/מ"ק לעומת 1,853–1,887 ק"ג/מ"ק. הפקק הראשון בא מראש הצינור, מהחלק הצעיר ביותר של הכוכב, העשיר ביותר במים ובגזים; הפקק השני, היבש והקשה יותר, נוצר מאוחר יותר

ועמוק יותר בצינור שהתפנה. סדר הצפיפויות הוא סדר היריות. הירחים הם דגימות של מאדים הצעיר: שליש עד מחצית מכל אחד מהם הם חלל ריק, קצף שקפא, וצפיפויותיהם, 1,471 וכ-1,860 ק"ג/מ"ק, הן צפיפויות השכבות העליונות של כוכב שצפיפותו הממוצעת הייתה כ-1,170 — קל, נקבובי ועשיר במים.

K פובוס

K.1 חריצי היציאה

פובוס חצוי במשפחות של חריצים ארוכים ומקבילים (Thomas et al. 1979; Murray & Heggie 2014). בתיאור של מאמר זה הם קודם כול סימני הירייה: פקק קשה ויבש שנדחף במעלה צינור געשי, נלחץ על ידי כוח קוריוליס אל דופן המערבית (C.7S) ומתחכך בה, נחרץ לאורכו, ואותו חיכוך גם בלם אותו. החריצים שרדו משום שפובוס פגש רק את השוליים הדקים והגזיים של טבעת דועכת ואיבד רק כ-1% מעצמו, שכבה של כ-40 מטר. עצם שרידותם היא התיעוד של הדחיפה שירתה אותו.



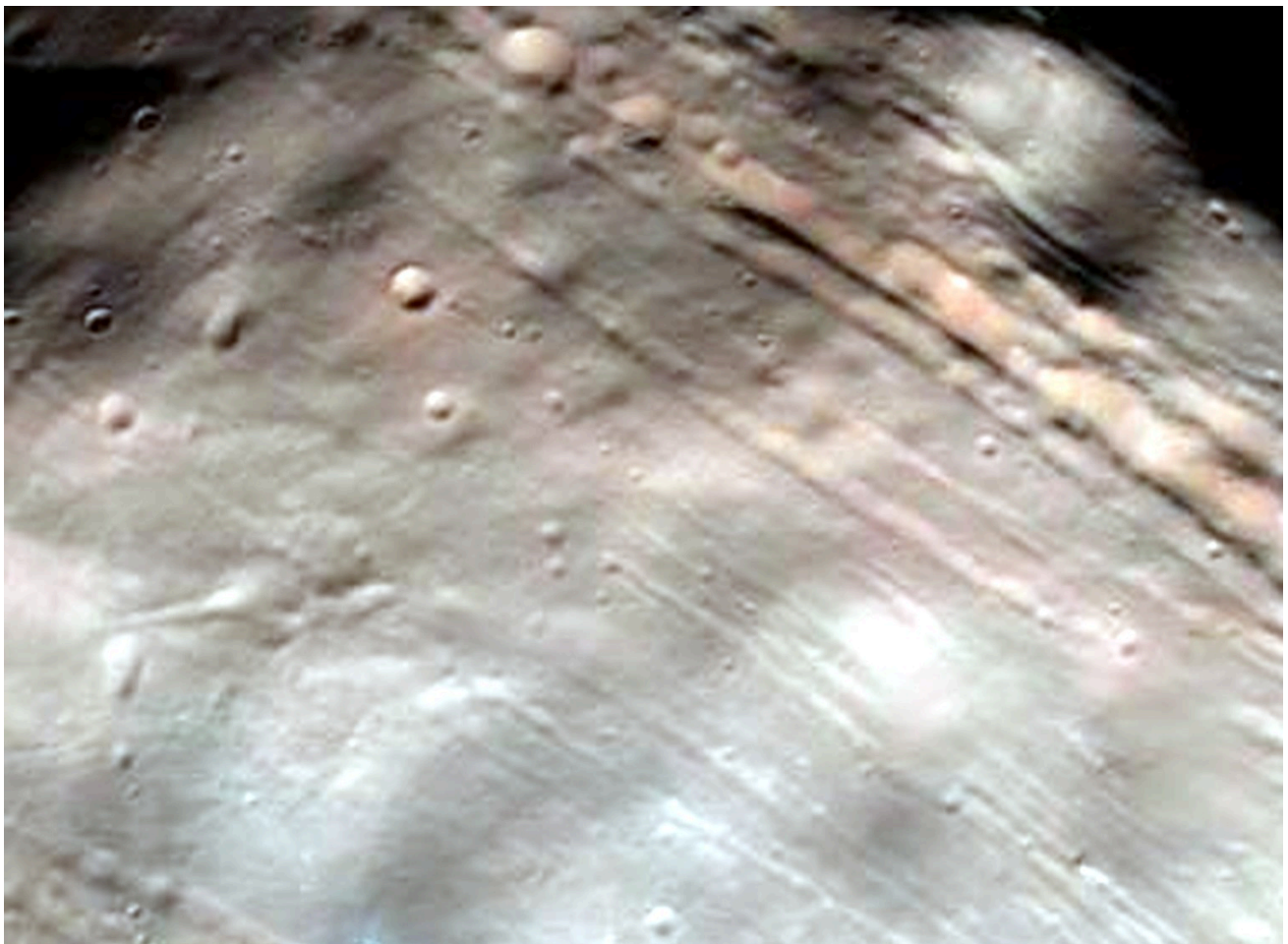
איור 5. פובוס, HiRISE. חריצים ארוכים ומקבילים ושרשראות בורות; Stickney מימין. קרדיט: NASA/JPL-Caltech/University of Arizona (PIA10368).

K.2 קמטי ההתכווצות

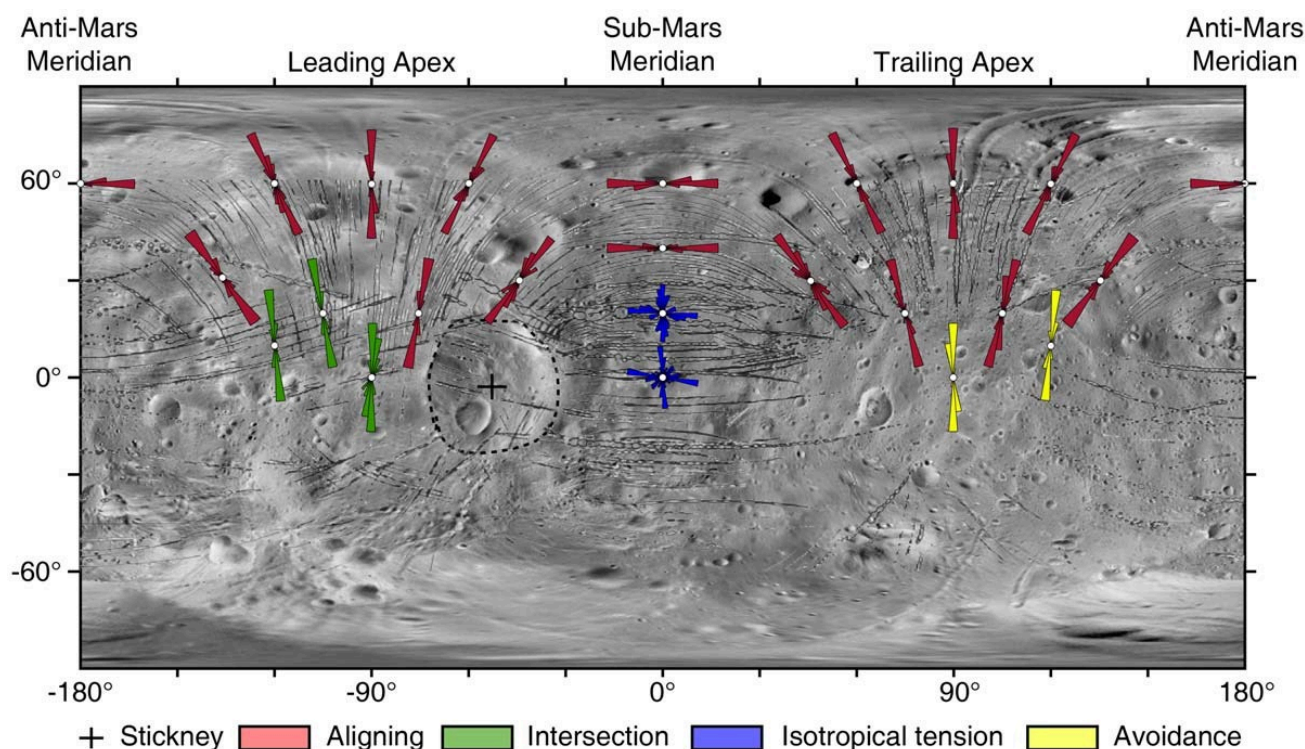
פובוס יצא חם, מלא גז ומתופח. בחלל הוא התקרר מבחוץ פנימה: הקליפה שלו התקשתה ראשונה, והפנים המשיך להתכווץ מתחתיה. אבן שמתקררת ב-1,000 קלווין מתכווצת באורכה בכ-3% ($\alpha \approx 3 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$), פי מאה ממה שאבן יכולה להימתח לפני שהיא נשברת; הקליפה נאלצה להיסדק ולהתקמט, כמו קליפתו של תפוח אפוי או של צימוק. שרשראות הבורות שלאורך החריצים מתפרשות כאן כקמטים וקריסות כאלה, ולא כמכתשי פגיעה.

K.3 קמטים אינם מכתשים

ההבדל ניכר על פני השטח. מכתש פגיעה שנופל על חריץ חותך אותו: המכתש צעיר יותר, והוא מוחק את החלק של החריץ שהוא נופל עליו. מכתשים כאלה קיימים על פובוס, מונחים על חריצים, והם קוטעים אותם. שרשראות הבורות עושות את ההפך: הן רצות לאורך החריצים, מתמזגות בהם ולעולם אינן חוצות אותם. אילו היו פגיעות, הן היו מוחקות חריצים בכל מקום שנפלו; במקום זאת הן שייכות לחריצים. הן חלק מאותו מבנה — קמטים וקריסות של קליפה מתכווצת — ולא גשם מאוחר מבחוץ. לצידן נושא פובוס פגיעות אמיתיות: שקעים ישנים ושחוקים מתקופת הטבעת, מכתשים קטנים שנוצרו על ידי חומר שנע בטבעת, ומכתשים חדים שנוצרו אחרי שהיא נעלמה. שקעים מונחים על שקעים, דבר שקמט לעולם אינו עושה. ההבחנה היא בין שני תוצרים, ואין בה טענה שאין מכתשים. הפגיעה הגדולה ביותר היא Stickney, שקוטרו 9 ק"מ, בצד הקדמי: גוף מוצק שכבר נע בטבעת לפני שפובוס יצא, ונפגש חזיתית עם פובוס שעדיין היה חם. די בגוף פוגע של 1.5–2 ק"מ במהירות של כקילומטר לשנייה; הוא האט את פובוס בכמטר לשנייה, ולא היה לו כל חלק בהשארתו בתוך הקו.



איור 6. פובוס, פרט מתוך HiRISE. במרכז: מכתשי פגיעה קטנים המונחים על חריצים וחותרים אותם. מימין למעלה: שרשראות בורות הרצות לאורך החריצים ומתמזגות בהם — חלק מהחריץ, לא מאוחרות לו. קרדיט: NASA/JPL-Caltech/University of Arizona (HiRISE, פרט).



איור 7. כיווני החריצים על פובוס כפי שמופו על ידי Cheng et al. (2022). החריצים יוצרים כמה משפחות גדולות ועקביות על פני הגוף כולו. קרדיט: Cheng, Asphaug, Ballouz, Yu & Baoyin (2022), *Planet. Sci. J.* 3, 249, CC BY 4.0.

K.4 מסלולו של גוף שהחל לחזור

פובוס מקיף את מאדים ב-7.65 שעות, 3.2 פעמים בכל יום מאדימי, במהירות של 2.14 ק"מ לשנייה; מסלולו כמעט מעגלי (0.015) ונמצא בטווח של כמעלה אחת ממישור המשווה. בתוך קו הקורטציה כל גוף מקיף מהר יותר משהכוכב מסתובב; הגאות שהוא מעורר מפגרת אחריו ומעכבת אותו, והוא יורד בספירלה. זה מה שפובוס עושה, וזה מה שעשה מאז שהקו הנע השיג אותו, בכ-19,000 ק"מ (G.3§). החישוב לאחור שלהלן אינו תלוי באופן שבו הגיע פובוס לגובה הזה; הוא קובע רק היכן עמד כשהחלה נפילתו.

תחילת הנפילה	המרחק אז	זמן ההקפה שלו אז
לפני 3.5 מיליארד שנה	ק"מ 18,807	שעות 21.8
לפני 3.9 מיליארד שנה	ק"מ 19,119	שעות 22.3
לפני 4.5 מיליארד שנה	ק"מ 19,541	שעות 23.0
היום	ק"מ 9,375	שעות 7.65

טבלה 6. פובוס בחישוב לאחור, עם החיכוך הגאותי הנמדד למאדים כיום ($k_2/Q = 1.816 \times 10^{-3}$). בכל המקרים הוא התחיל בטווח של אחוזים ספורים מקו הקורטציה של מאדים שהאט, ומאז הוא נופל.

K.5 מדוע פובוס מקיף כיום 3.2 פעמים ביום מאדימי

כשהחלה נפילתו, פובוס ומאדים היו כמעט מתואמים: בכ-19,100 ק"מ השלים פובוס הקפה אחת ב-22.3 שעות, ומאדים הסתובב פעם אחת בכ-22 שעות — קרוב להקפה אחת ליום מאדימי. היחס 3.2 הנראה כיום נבנה אחר כך, על ידי שני שינויים שפעלו באותו כיוון.

פובוס נפל, והנפילה האיצה אותו. מהירותו של ירח נקבעת לפי מרחקו: ככל שהוא קרוב יותר, הוא מהיר יותר. הגאות מעכבת את פובוס ולוקחת ממנו אנרגיה, והוא שוקע; תוך כדי שקיעה הוא מאיץ, מכ-1.50 ק"מ לשנייה ב-19,100 ק"מ ל-2.14 ק"מ לשנייה ב-9,375 ק"מ. זמן ההקפה שלו התקצר מ-22.3 ל-7.65 שעות — פי 2.9.

מאדים האט. הכוכב המשיך לאבד סיבוב עם החומר והגז שיצאו ממנו דרך קו הקורטציה, והטבעת ביניהם: טבעת שמחוץ לקו נושאת עימה את הסיבוב שהיא מחזיקה, וכשנעלמה, הסיבוב הזה לא חזר. היום המאדימי התארך מכ-22 ל-24.6 שעות — פי 1.1.

מרחקו של פובוס	ק"מ 19,100	ק"מ 9,375	שינוי
מהירותו של פובוס	ק"מ/ש 1.50	ק"מ/ש 2.14	
זמן ההקפה של פובוס	שעות 22.3	שעות 7.65	מהיר יותר $2.9 \times$ (הנפילה)
היום המאדימי	שעות ≈ 22	שעות 24.6	איטי יותר $1.1 \times$ (מאדים)
הקפות ליום מאדימי	≈ 1	3.2	$2.9 \times 1.1 \approx 3.2$

טבלה 7. מהקפה אחת ליום ל-3.2. פובוס התחיל כמעט מתואם עם מאדים; נפילתו והאטת מאדים יחד יצרו את היחס הנראה כיום. הצבע מראה את ההפרש ההולך וגדל בין הירח לכוכב.

L עקבות הטבעת

- שני מסלולים משווניים.** שני הירחים נמצאים בטווח של שתי מעלות ממישור המשווה ובמסלולים כמעט מעגליים. טבעת במישור המשווה מושכת גוף שחוצה אותה אל המישור הזה ומעגלת את מסלולו.
- פנים שמשקפות את הזמן ואת המקום בטבעת.** הגוף ששהה זמן רב בטבעת חלק, מעוגל ונמצא על המעגל המושלם יותר (0.0003); הגוף שפגש רק את שוליה הדקים חרוץ, מחוספס בידי הגז ולא מוחלק, ושמר על אקסצנטריות קטנה (0.015).
- הנטייה של דימוס.** הטבעת השאירה את דימוס על מעגל במישור המשווה; הנטייה הנוכחית שלו, כ- 1.8° , נוספה מאוחר יותר, בתהודה עם ירח פנימי, ובספרות המקובלת היא עצמה פורשה כעקבה של טבעת עבר של מאדים (Ćuk et al. 2020). עבודה בלתי תלויה כבר מציבה אפוא טבעת סביב מאדים הצעיר.
- שקעים שחוקים.** השקעים של דימוס רדודים פי שלושה מאלה של פובוס (J.18), ושני הירחים נושאים דור ישן של שקעים שחוקים ומעוגלים מתחת לדור צעיר של מכתשים חדים. ירח שנפגע כשהוא עדיין חם ורך אינו נחפר לקערה אלא מתקפל פנימה: מגע במהירות נמוכה עם גופים שנעים כמעט בתיאום איתו מותיר שקעים רחבים ורדודים. רק ירח שעבר דרך טבעת נושא אותם. הם נוצרו מוקדם, ב-7,500–15,000 ק"מ, ולכן הטבעת הקרובה הכילה גופים מוצקים — אבן וקרח שנזרקו מהרי הגעש, ששורדים היטב בתוך גבול 13,000 הק"מ החל על קרח רופף (גוש קרח מוצק עד כ-7,700 ק"מ, אבן עד כ-5,300 ק"מ). השחיקה בטבעת החיצונית הגושית באה מאוחר יותר, והמכתשים החדים אחרונים, על גופים שכבר התקשו.
- קצה חד וקצה קהה.** על מודלי הצורה של Ernst et al. (2023) לכל ירח יש קצה חד אחד וקצה קהה אחד לאורך צירו הארוך: קילומטר אחד מאחורי הקצה, רדיוס החתך הוא 2.8 ק"מ בקצה החד של פובוס לעומת 4.7 ק"מ בקצהו הקהה, ו-2.4 לעומת 2.9 ק"מ בדימוס. גוף שניתן לשחיקה בתוך זרימה נשחק לחוד הפונה אל הזרימה (Ristroph et al. 2012); בטבעת הגיעה הזרימה מאחור. הגאות נעלה אחר כך כל ירח כשצירו הארוך מכוון אל מאדים וקצהו הקהה והכבד יותר פונה אל הכוכב, כפי שהצד הקרוב והכבד יותר של הירח שלנו פונה אל כדור הארץ; כיום הקצוות החדים מצביעים הרחק ממאדים (תחזית N.5).
- הירח מעולם לא עבר דרך טבעת.** סביב כדור הארץ הצעיר לא יכלה להתקיים טבעת: האגס שבנה את הירח סחף את הרצועה שבה הייתה נוצרת ואסף את החומר שלה. דימוס, ששהה זמן רב בטבעת, חלק ומוקטן; פובוס, ששהה זמן קצר בשוליה, חרוט; הירח שומר על רשומת מכתשים רוויה ועל מסתו כולה. משך הזמן שגוף שהה בטבעת קובע כמה מפניו הראשונים איבד.

- **גילים.** ספירת מכתשים מעמידה את פני השטח של פובוס על כ-4.3 מיליארד שנה בכרונולוגיה של מסלול מאדים, או 3.5 בכרונולוגיה של חגורת האסטרואידים (Schmedemann et al. 2014); פני השטח של שני הירחים קרובים לרוויה ובעלי צפיפות מכתשים דומה. התיאור צופה שדימוס יהיה המבוגר יותר.

M המים

- **מים שעזבו.** מימן כבד מועשר פי שישה עד שבעה ביחס לאוקיינוסים של כדור הארץ, ושכבת מים מוקדמת של 137 מטר לפחות (Villanueva et al. 2015): התייעוד של הטבעת ושל האדים שיצאו לחלל.
- **מים שנשארו.** קרום ביניים רווי מים בעומק שבין 11.5 ל-20 ק"מ מתחת ל-InSight, השקול לשכבה כלל-כוכבית בעומק 1–2 ק"מ (Wright, Manga & Panning 2024): המים שלא מצאו את הצינורות הגעשיים ונשארו אטומים מתחת לקרום. הירחים, שהיו רכים כשנפגעו, מראים שהקרקע מתחת לפני השטח הצעירים הייתה רכה וספוגה במים; קרום הביניים של היום הוא מה שנשאר ממנה.
- **קרום אטום אחד.** אותו קרום אטום שהחזיק את הגז עד שהפקקים זזו הוא הקרום שמחזיק את המים כיום.

חלק ג – התחזיות

כל תחזית מציינת מה צפוי, את הערך שלו במקום שבו ניתן לתת ערך, את המכשיר או הנתונים שימדדו אותו, מתי, ומה ההסבר המקובל צופה באותו מקום – כך שכל מדידה מבחינה בין שני ההסברים.

N התחזיות

תחזית	הצפוי (מאמר זה)	נמדד באמצעות	מתי	מה ההסבר המקובל צופה
N.1 החומר של פובוס	קרום מאדים שעבר שינוי במים: איזוטופים של חמצן, כרום וטיטניום על הקו של מאדים; אין רכיב של גוף פוגע; איזוטופים של אבץ ואשלגן שלא הוסטו בהתאדות; מינרלים מוזנים (קשורי מים); בועות סגורות של קצף שהתקרר	דגימות 10, MMX גרם לפחות של רגולית	חזרה ב-2031	דיסקת פגיעה: תערובת של מאדים ושל הגוף הפוגע, שחלק גדול ממנה נמס ועבר עיבוי מחדש. לכידה: חומר אסטרואידי קדום
N.2 החריצים של פובוס	החריצים ושרשראות הבורות הם מבנה אחד: בורות לעולם אינם חוצים חריצים; החריצים מרוכזים בצד שפנה מערבה בתוך הצינור הגעשי; דפנות החריצים מצטרות כלפי מטה (סדקי מתיחה בצורת V); פני שטח שנחרטו והוחספסו באבק שנישא בגז, ולא הוחלקו: שולי החריצים חדים או בלויים מעט בלבד, בניגוד לפני השטח המעוגלים של דימוס	הדמיה של MMX; גישוש מכ"ם עתידי	מ-2027 והלאה	גאות, או חומר שנפלט מ-Stickney; שרשראות הבורות כפגיעות משניות

שקעים רדודים ובלויים (עומק חציוני של כ-2% מהרוחב, לעומת 5.5% בפובוס); רכסים נמוכים שהם שורשי הקמטים הגבוהים ביותר; הרכב זהה לזה של פובוס	יעפי MMX ליד דימוס	אחרי 2027	שברים שהצטברו; החלקות נובעת ממילוי ברגולית	N.3 פני השטח של דימוס
הלוע העמוק ביותר ביחס לרוחבו מבין הארבעה (עומק/רוחב ≈ 0.10); חוסר מסה מתחתיו	טופוגרפיה של MOLA; מודלי כבידה	עכשיו	לוע פסגה רגיל של הר געש מגן	N.4 הלוע של Pavonis
אותו חומר של מאדים בשניהם, ודימוס הרטוב יותר (הקל יותר); מרכז המסה של פובוס מוסט לכיוון מאדים, לכיוון הקצה הקהה שלו	דגימות MMX, יעפים ושדה הכבידה	2027–2031	היסטוריות שונות; אין תחזית למרכז המסה	N.5 שני הירחים
קרום אמצעי רווי מים מתחת ל-Tharsis, כמו מתחת ל-InSight	תחנות סייסמיות עתידיות	בעתיד	אין קשר בין הירחים לבין מים קבורים	N.6 מים מתחת ל- Tharsis
רכיב עתיק מ-4 מיליארד שנה, בהרכב של הרגולית של פובוס, עם גרגרים הנושאים הליום ונאון של רוח השמש; הנפוץ ביותר ברצועה המשוונת הרחבה וב"בשות האבק" (Tharsis, Arabia), (Terra, Elysium), מעורב בסלע שנטחן ביובש וברוח	דגימות הרגולית של Perseverance שיחזורו; MMX	מ-2031 והלאה	אבק מבלייה של סלע בלבד; אין רכיב עתיק נפרד	N.7 האבק של מאדים

טבלה 8. תחזיות, מדידות ומועדים. MMX משוגרת באוקטובר 2026, נוחתת על פובוס ב-2027 ומחזירה את דגימותיה ב-2031, עם כמה יעפים ליד דימוס (JAXA; Kuramoto et al. 2022). הרשימה המלאה של המדידות המוצעות, משימה אחר משימה, מופיעה בנספח ב.

0 מה ההסבר דורש

- מאדים צעיר מהיר ומורחב:** רדיוס של כ-1.5 פעמים הרדיוס של היום ויממה של 5 שעות. כוכב הלכת החזיק אז סיבוב של כ-12 פעמים הסיבוב של היום, והוא חייב היה לאבד כ-92% ממנו, בעיקר עם חומרים נדיפים שיצאו דרך קו הקורוטציה — בסדר גודל של 5–20% מהמסה ההתחלתית (H.3§).

2. **מאדים צעיר רך:** פיזור אנרגיה גדול פי 8 עד 20 מזה של היום, במשך חצי מיליארד עד מיליארד שנה, כך שהגאות נשאה את דימוס מהטבעת בכ-10,000 ק"מ אל 23,463 ק"מ, מעבר ל-20,428 ק"מ, לפני שמאדים הואט ליממה של היום (G.2§).
3. **דחיפת הגז:** Pavonis בגובה של כ-30 ק"מ, צינור שנקדח לכל גובהו בידי אדים ושברי סלע, פקק רך וחם האוטם אותו בבסיסו, וגז כלוא בלחץ של 0.5–0.9 ג'יגה-פסקל המניע את הפקק במעלה הצינור בתוך פחות מדקה, כשמסת הגז היא בערך כמסת הפקק. הדפנות צריכות להחזיק את הלחץ הזה למשך הזמן הזה, פי שלושה עד חמישה ממה שהחומר שמסביב לוחץ בחזרה; הקרום הקר והעבה, הפקק האוטם ומשך הזמן הקצר צריכים לסגור את הפער (C§). זהו השלב המכריע של ההסבר.
4. **האטמוספירה והטבעת:** אטמוספירת אדים צפופה המסתובבת עם מאדים מתחת לקו הקורטציה, הנושאת את הפקק העולה בסיבובה (E.2§); ומעל הקו טבעת שנבנתה על ידי מאדים מהקיטור שלו עצמו בשלביו הראשונים, עמדה במישור המשווני בגובה המסלולים הראשונים של הירחים בזמן שנורו, ומסיבית די הצורך כדי לתת לכל גוף את המהירות הצידיית שעדיין חסרה לו — מ-0.03 ועד כ-0.56 ממסתו בצימוד מושלם, וכמה מונים יותר בפועל (F§). ההסבר עומד או נופל עם הטבעת: בלעדיה, פקק שנורה מפני השטח נופל בחזרה.
5. **התזמון:** דימוס נורה ראשון, כשהטבעת הייתה צפופה והקו היה קרוב לקרקע; פובוס נורה מאוחר יותר, מואט וחלש יותר, אל השוליים הדלילים של טבעת שהלכה ודעכה, כשהקו עדיין היה מתחתיו. הגאות דחפה אותו החוצה, אבל הקו נע החוצה מהר יותר ותפס אותו סמוך ל-19,000 ק"מ, כשהיממה הייתה כ-22 שעות (G.3§).
6. **הצבע:** הספקטרום הכהה, בעל המראה הקדום, של שני הירחים חייב לנבוע מחומר של מאדים שעבר שינוי במים ובחשיפה ארוכה בחלל.
7. מחקר ממוקד עשוי לתת מספרים משוערים שונים במקצת מאלה של מאמר זה; רצף האירועים אינו תלוי בערכיהם המדויקים.

נספח א — שחזור המספרים

כל מספר במאמר זה מודפס על ידי הסקריפט `mars2_numbers.py` (Python 3, ספרייה סטנדרטית בלבד), השמור עם קבצי המאמר. הקלטים: $GM = 42\,828 \text{ km}^3 \text{ s}^{-2}$; הרדיוס של היום 3,389.5 ק"מ, היממה 24.6229 שעות, מקדם מומנט ההתמד 0.3644; הרדיוס הצעיר $1.5 \times$ הרדיוס של היום, יממה של 5 שעות, גוף הומוגני ($k = 0.4$); Pavonis בגובה 30 ק"מ, צינור באורך 20–40 ק"מ; פקק של דימוס באורך 14 ק"מ בצפיפות 1,200 ק"ג/מ"ק ופקק של פובוס באורך 18 ק"מ בצפיפות 1,600 ק"ג/מ"ק; פובוס ב-9,375 ק"מ, בנפח 5,740 קמ"ק; דימוס ב-23,463 ק"מ, ברדיוס 6.2 ק"מ; הלוע של Pavonis ברוחב 47 ק"מ ובעומק 4.8–5.0 ק"מ; החיכוך הגאותי היום $k_2/Q = 1.816 \times 10^{-3}$. ההתרחקות החוצה של כל ירח מעבר לקו מחושבת באינטגרציה של $da/dt = 3 (k_2/Q) (m/M) (R/a)^5 na$ עם הרדיוס של מאדים הצעיר ועם פיזור גדול פי 8–20 מזה של היום; יחסי העומק לרוחב של J.1§ נמדדים על מודלי הצורה של Ernst et al. (2023) ברזולוציה של 36 מ' (פובוס) ו-41 מ' (דימוס), באותה שיטת זיהוי לשניהם. מהירויות השיגור נפתרות ממשוואות האנרגיה והתנע הזוויתי עבור שיגור משווני מן הפסגה עם המהירות הצידיית החופשית של הקרקע, במעוף חופשי, וכגבול השני — עבור פקק שהאטמוספירה מחזיקה אותו בסיבוב עד הקו; הלחצים בצינור מחושבים לפי $\bar{p} = \rho_p v^2 L_p / 2 L_b + \rho_p g_{\text{eff}} L_p$; הדופן מחזיקה בערך פי שניים מלחץ החומר שמסביב, ועוד חוזק החומר; גבול תותח הגז הוא $2c_0 / (\gamma - 1)$; הסיבוב שהוצא דרך הקו מחושב באינטגרציה של $dL = \omega r_{\text{co}}^2 dm$ לאחור מהיום.

נספח ב — מדידות מוצעות ל-MMX ולמשימות אחרות

את התחזיות של מאמר זה אפשר לבדוק במדידות שמשימות קיימות ומתוכננות בנויות לבצע. אנו מפרטים אותן לפי משימה, כדי שכל צוות יוכל לראות מה ההסבר מבקש מהנתונים שלו. כל שורה מציינת מה למדוד, מה ההסבר צופה, איזו תוצאה תפריך אותו, ומה ההסבר המקובל צופה.

#	מדידה	הצפוי כאן	מופרך אם	ההסבר המקובל
MMX (JAXA): נחיתה על פובוס ב-2027, החזרת דגימות ב-2031, יעפים ליד דימוס				
B1	איזוטופים של O, Cr Ti-; היחס D/H בדגימות פובוס	על הקו של מאדים	ערכים של אסטרואיד קדום	לכידה: אסטרואיד. פגיעה: מאדים בתוספת הגוף הפוגע
B2	רכיב זר	אין: מאדים טהור	רכיב משמעותי של גוף פוגע	פגיעה: רכיב גדול
B3	איזוטופים של K ו- Zn	לא מוסטים: אין התאדות ועיבוי מחדש	חוסר באיזוטופים הקלים	פגיעה: חוסר
B4	מרקם הגרגרים	קצף געשי שהתקרר: בועות סגורות, מינרלים מוקנים	כדוריות זכוכית שהתעבו מאדים	פגיעה: נמס ועבר עיבוי מחדש
B5	שדה הכבידה של פובוס	מרכז המסה מוסט לכיוון מאדים, לכיוון הקצה הקהה	מוסט לכיוון הקצה החד	אין תחזית
B6	הדמיה של החריצים	שרשראות בורות לאורך החריצים, לעולם לא חוצות אותם; החריצים מרוכזים בצד אחד; שוליים חדים או בלויים מעט; פני שטח חרוטים, לא מוחלקים	שרשראות בורות החוצות חריצים באופן אקראי	גאות, או חומר שנפלט מ-Stickney
B7	יעפים ליד דימוס: צורה ושקעים	שקעים רדודים ובלויים; קצה חד וקצה קהה, והקצה הקהה פונה למאדים; הרכב כשל פובוס	הרכב שונה משל פובוס	שברים שהצטברו; מילוי ברגולית
מקיפי מאדים (MRO, Mars Express, TGO)				
B8	צילומים ממזרח לכל אחד מארבעת הרי הגעש של Tharsis, לאורך קו הרוחב שלהם	שרשראות של גושים גדולים או מכתשים: יריות שנפלו בחזרה	—	אין קשר להרי הגעש

B9	הכבידה מתחת ללוע של Pavonis	חוסר מסה: תא שירה	עודף מסה	לוע רגיל של הר געש מגן
דגימות הרגולית של Perseverance שיוחזרו				
B10	גיל של גרגרי אבק בודדים	רכיב עתיק מ-4 מיליארד שנה, מעורב בסלע שנטחן במקום	—	סלע שעבר בלייה בלבד
B11	He ו-Ne של רוח השמש בגרגרים	גרגרים עתיקים הנושאים אותם, מתקופת שהותם בחלל בטבעת	אין גרגרים כאלה	אין גרגרים כאלה
B12	ההרכב של הרכיב העתיק	כשל הרגולית של פובוס	שונה ממנה	אין תחזית
תחנות סייסמיות עתידיות				
B13	הקרום האמצעי מתחת ל-Tharsis	רווי מים, כמו מתחת ל-InSight	יבש	אין קשר לירחים
משימה עתידית				
B14	דגימה מדימוס	אותה טביעת אצבע של מאדים כמו בפובוס	מוצא שונה	היסטוריות שאינן קשורות זו לזו

טבלה B1. מדידות מוצעות, משימה אחר משימה.

מקורות

- Basilevsky, A. T., Lorenz, C. A., Shingareva, T. V., Head, J. W., Ramsley, K. R., & Zubarev, A. E. (2014). The surface geology and geomorphology of Phobos. *Planetary and Space Science*, 102, 95–118.
- Canup, R., & Salmon, J. (2018). Origin of Phobos and Deimos by the impact of a Vesta-to-Ceres sized body with Mars. *Science Advances*, 4, eaar6887.
- Clarke, A. B., Esposti Ongaro, T., & Belousov, A. (2015). Vulcanian eruptions. In H. Sigurdsson et al. (Eds.), *The Encyclopedia of Volcanoes* (2nd ed., pp. 505–518). Academic Press.
- Cheng, B., Asphaug, E., Ballouz, R.-L., Yu, Y., & Baoyin, H. (2022). Numerical simulations of drainage grooves in response to extensional fracturing: testing the Phobos groove formation model. *The Planetary Science Journal*, 3, 249.
- Ćuk, M., Minton, D. A., Pouplin, J. L. L., & Wishard, C. (2020). Evidence for a past Martian ring from the orbital inclination of Deimos. *The Astrophysical Journal Letters*, 896, L28.
- Ernst, C. M., Daly, R. T., Gaskell, R. W., et al. (2023). High-resolution shape models of Phobos and Deimos from stereophotoclinometry. *Earth, Planets and Space*, 75, 103.
- Hesselbrock, A. J., & Minton, D. A. (2017). An ongoing satellite–ring cycle of Mars and the origins of Phobos and Deimos. *Nature Geoscience*, 10, 266–269.

- Hurford, T. A., Asphaug, E., Spitale, J. N., et al. (2016). Tidal disruption of Phobos as the cause of surface fractures. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 121, 1054–1065.
- Hyodo, R., Genda, H., Charnoz, S., & Rosenblatt, P. (2017). On the impact origin of Phobos and Deimos I: thermodynamic and physical aspects. *The Astrophysical Journal*, 845, 125.
- IAU Working Group for Planetary System Nomenclature / USGS Astrogeology Science Center. *Gazetteer of Planetary Nomenclature*, entry “Pavonis Mons”. <https://planetarynames.wr.usgs.gov/>.
- JAXA. *Martian Moons eXploration (MMX)*, mission overview and schedule. <https://www.mmx.jaxa.jp/en/>.
- Kuramoto, K., Kawakatsu, Y., Fujimoto, M., et al. (2022). Martian Moons Exploration MMX: sample return mission to Phobos elucidating formation processes of habitable planets. *Earth, Planets and Space*, 74, 12.
- Murray, J. B., & Heggie, D. C. (2014). Character and origin of Phobos’ grooves. *Planetary and Space Science*, 102, 119–143.
- NASA/JPL Solar System Dynamics. *Planetary Satellite Physical Parameters*. https://ssd.jpl.nasa.gov/sats/phys_par/.
- Ojha, L., Lewis, K., Karunatillake, S., & Schmidt, M. (2018). The Medusae Fossae Formation as the single largest source of dust on Mars. *Nature Communications*, 9, 2867.
- Pätzold, M., Andert, T. P., Cardesín-Moinelo, A., Cicchetti, A., & Ziese, R. (2025). Investigations of the Moon Phobos by Mars Express and implications towards its origin. *Space Science Reviews*, 221, 41.
- Ramsley, K. R., & Head, J. W. (2019). Origin of Phobos grooves: testing the Stickney crater ejecta model. *Planetary and Space Science*, 165, 137–147.
- Ristroph, L., Moore, M. N. J., Childress, S., Shelley, M. J., & Zhang, J. (2012). Sculpting of an erodible body by flowing water. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109, 19606–19609.
- Rosenblatt, P., Charnoz, S., Dunseath, K. M., et al. (2016). Accretion of Phobos and Deimos in an extended debris disc stirred by transient moons. *Nature Geoscience*, 9, 581–583.
- Schmedemann, N., Michael, G. G., Ivanov, B. A., Murray, J. B., & Neukum, G. (2014). The age of Phobos and its largest crater, Stickney. *Planetary and Space Science*, 102, 152–163.
- Thomas, P. (1979). Surface features of Phobos and Deimos. *Icarus*, 40, 223–243.
- Thomas, P., Veverka, J., Bloom, A., & Duxbury, T. (1979). Grooves on Phobos: their distribution, morphology and possible origin. *Journal of Geophysical Research*, 84, 8457–8477.
- Villanueva, G. L., Mumma, M. J., Novak, R. E., et al. (2015). Strong water isotopic anomalies in the martian atmosphere: probing current and ancient reservoirs. *Science*, 348, 218–221.
- Wright, V., Manga, M., & Panning, M. P. (2024). Liquid water in the Martian mid-crust. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 121, e2409983121.
- המחבר:** זהר דוראן, חוקר עצמאי, רמלה, ישראל. ORCID 0009-0005-3194-9387. לא התקבל מימון ציבורי או מסחרי.