נושא 6 מתוך 8 • מכניקה

# כבידה: 15 תרגילים

אינסוף

פיזיקה • מכניקה

חוק הכבידה, חוקי קפלר, שדה הכבידה, לוויינים ומהירות מילוט • מהבסיס ועד שאלות אתגר

כיתה י״א | 5 יח״ל | מכינה קדם־אקדמית

### איך עובדים עם הקובץ?

השאלות מסודרות לפי תתי־נושאים, ובכל תת־נושא מהקל לקשה: חוק הכבידה (שאלות 1 ו־2), חוקי קפלר (3 ו־4), שדה הכבידה ותאוצת הנפילה (5 עד 7), לוויינים במסלול מעגלי (8 עד 11), אנרגיה ומהירות מילוט (12 עד 14) ומסלול מעבר אליפטי (15). התשובות הסופיות נמצאות בסוף הקובץ. נסו לפתור לבד לפני שאתם מציצים!

אתגר קשה יותר מהרגיל בבגרות  מכינה ברמה של המכינה הקדם־אקדמית  חשיבה סעיף שעיקרו הסבר במילים

נתונים לכל השאלות: $G = 6.67 \times 10^{-11}\ \mathrm{N \cdot m^2/kg^2}$. לכדור הארץ מסה של $6.0 \times 10^{24}\ \mathrm{kg}$ ורדיוס של $6.4 \times 10^{6}\ \mathrm{m}$, ותאוצת הנפילה על פניו היא $g_0 = 9.8\ \mathrm{m/s^2}$. יממה היא $24$ שעות. $T$ מסמן זמן מחזור. המסלולים מעגליים והתנגדות האוויר זניחה, אלא אם נאמר אחרת.

## שאלה 1

בניסוי דומה לניסוי של קבנדיש, כדור עופרת גדול שמסתו $150\ \mathrm{kg}$ וכדור עופרת קטן שמסתו $0.75\ \mathrm{kg}$ מונחים זה ליד זה. המרחק בין המרכזים שלהם הוא $25\ \mathrm{cm}$.

**א.** מה גודל כוח המשיכה בין שני הכדורים?

**ב.** פי כמה הכוח הזה קטן מהמשקל של הכדור הקטן?

**ג.** מרחיקים את הכדור הגדול, עד שהמרחק בין המרכזים הוא $50\ \mathrm{cm}$. מה גודל כוח המשיכה עכשיו?

**ד.** חוזרים למצב של סעיף א. מה גודל הכוח שהכדור הקטן מפעיל על הכדור הגדול, ומה כיוונו? אילו פעל על כל כדור רק כוח המשיכה ההדדי, מה הייתה התאוצה של כל אחד מהם?

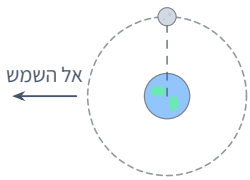
**ה.** במצב של סעיף א, הכדור הגדול מקובע במקומו, והכדור הקטן משוחרר ממנוחה. הניחו שבכיוון התנועה פועל עליו רק כוח המשיכה של הכדור הגדול, ושלאורך קטע קצר כזה הכוח כמעט קבוע. כמה זמן ייקח לכדור הקטן להתקרב לגדול ב־$1\ \mathrm{mm}$?

**ו.** שתי מכוניות, שמסתה של כל אחת מהן $1000\ \mathrm{kg}$, חונות זו ליד זו, והמרחק בין המרכזים שלהן הוא $5\ \mathrm{m}$. הַעריכו את כוח המשיכה ביניהן, כאילו היו גופים נקודתיים. למה המכוניות לא מתקרבות זו לזו? חשיבה

---

## שאלה 2

הירח, שמסתו $7.4 \times 10^{22}\ \mathrm{kg}$, נע סביב כדור הארץ במרחק $3.84 \times 10^{8}\ \mathrm{m}$ ממרכזו. כדור הארץ נע סביב השמש, שמסתה $2.0 \times 10^{30}\ \mathrm{kg}$, במרחק $1.5 \times 10^{11}\ \mathrm{m}$ ממנה. המרחק בין הירח לשמש שווה בקירוב למרחק בין כדור הארץ לשמש.



סעיף ג: ״חצי ירח״

**א.** מה גודל הכוח שכדור הארץ מפעיל על הירח?

**ב.** מה גודל הכוח שהשמש מפעילה על הירח? איזה משני הכוחות גדול יותר, ופי כמה?

**ג.** ברגע מסוים הקו שמחבר את כדור הארץ לירח ניצב לקו שמחבר את כדור הארץ לשמש (״חצי ירח״, בשרטוט). מצאו את הכוח השקול שהשמש וכדור הארץ מפעילים יחד על הירח: את גודלו, ואת הזווית שלו ביחס לכיוון אל השמש.

**ד.** מצאו את הכוח השקול על הירח במולד, כשהירח נמצא בין כדור הארץ לשמש, ובירח מלא, כשכדור הארץ נמצא בין הירח לשמש.

**ה.** הירח ממשיך להקיף את כדור הארץ. איך זה מתיישב עם התשובה שלכם לסעיף ב? חשבו לשם כך את התאוצה שהשמש מקנה לכדור הארץ, והשוו אותה לתאוצה שהשמש מקנה לירח. אתגר חשיבה


© אור בן שטרית · אינסוף

## שאלה 3

ב־1610 גילה גלילאו ארבעה ירחים שמקיפים את צדק. בטבלה נתונים על המסלולים שלהם, וחלק מהערכים חסרים.

| ירח | איו | אירופה | גנימד | קליסטו |
|---|---|---|---|---|
| רדיוס המסלול ($10^8\,\mathrm{m}$) | $4.22$ | $6.71$ | ? | $18.8$ |
| זמן המחזור (ימים) | $1.77$ | ? | $7.15$ | $16.7$ |

**א.** למה הגילוי של הירחים האלה היה טיעון נגד המודל שבו הארץ נמצאת במרכז העולם? (חשיבה)

**ב.** חשבו את היחס $\frac{T^2}{r^3}$ לאיו ולקליסטו, ביחידות של הטבלה. מה מראה ההשוואה?

**ג.** היעזרו בנתונים של איו, ומצאו את זמן המחזור של אירופה ואת רדיוס המסלול של גנימד.

**ד.** חשבו את המסה של צדק. פי כמה היא גדולה ממסת כדור הארץ?

**ה.** הירח שלנו מקיף את כדור הארץ במרחק $3.84\times10^8\,\mathrm{m}$, לא רחוק מהמרחק של איו מצדק, אבל זמן המחזור שלו הוא $27.3$ ימים. השתמשו רק בנתונים של איו ושל הירח, בלי $G$ ובלי מסת כדור הארץ, ומצאו את היחס בין מסת צדק למסת כדור הארץ.

## שאלה 4

שביט האלי נע במסלול אליפטי סביב השמש. המרחק הקטן ביותר שלו מהשמש הוא $0.59\,\mathrm{AU}$, והמרחק הגדול ביותר הוא $35.1\,\mathrm{AU}$. יחידה אסטרונומית ($1\,\mathrm{AU}$) היא המרחק הממוצע של כדור הארץ מהשמש, וזמן המחזור של כדור הארץ הוא שנה. בנקודה הקרובה ביותר לשמש מהירות השביט היא $54.5\,\mathrm{km/s}$. בנקודה הזו, וגם בנקודה הרחוקה ביותר, המהירות ניצבת לקו שמחבר את השביט לשמש.

**א.** שרטטו באופן סכמטי את המסלול ואת מקום השמש. סמנו את הנקודה שבה מהירות השביט היא הגדולה ביותר ואת הנקודה שבה היא הקטנה ביותר, ונמקו לפי החוק השני של קפלר. (חשיבה)

**ב.** מה מהירות השביט בנקודה הרחוקה ביותר מהשמש?

**ג.** מה זמן המחזור של השביט? (בחוק השלישי של קפלר מציבים את המרחק הממוצע: הממוצע של המרחק הקטן ביותר והמרחק הגדול ביותר.)

**ד.** השביט עבר בנקודה הקרובה ביותר לשמש בפברואר 1986. באיזו שנה יגיע אליה שוב?

**ה.** פי כמה גדול הכוח שהשמש מפעילה על השביט בנקודה הקרובה ביותר, לעומת הנקודה הרחוקה ביותר?

## שאלה 5

**א.** מטוס נוסעים טס בגובה $11\,\mathrm{km}$. בכמה אחוזים קטנה שם עוצמת שדה הכבידה, לעומת פני הארץ? באיזה גובה קטן המשקל של גוף ב־$1\%$ לעומת המשקל שלו על פני הארץ?

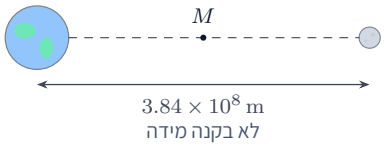
**ב.** המסה של שבתאי גדולה פי $95$ ממסת כדור הארץ, והרדיוס שלו גדול פי $9.5$ מהרדיוס של כדור הארץ. מה עוצמת שדה הכבידה בגובה העננים העליונים של שבתאי?

**ג.** השוו את התשובה לסעיף ב ל־$g_0$, והסבירו את התוצאה. זכרו שהמסה של שבתאי גדולה פי $95$ ממסת כדור הארץ. (חשיבה)

**ד.** אסטרונומים גילו כוכב לכת סלעי שהצפיפות הממוצעת שלו שווה לזו של כדור הארץ, והרדיוס שלו גדול פי $2$ מזה של כדור הארץ. מה תאוצת הנפילה על פניו?

**ה.** אדם שקופץ על פני הארץ לגובה $0.5\,\mathrm{m}$ קופץ על כוכב הלכת של סעיף ד באותה מהירות התחלתית. לאיזה גובה יגיע?

## שאלה 6




הירח, שמסתו $7.4 \times 10^{22}\,\mathrm{kg}$ והרדיוס שלו $1.74 \times 10^6\,\mathrm{m}$, נמצא במרחק $3.84 \times 10^8\,\mathrm{m}$ מכדור הארץ (המרחק בין המרכזים). הנקודה $M$ נמצאת באמצע הקטע שמחבר את המרכזים.

**א.** מה עוצמת שדה הכבידה של כדור הארץ במקום שבו נמצא הירח? לאן הוא מכוון?

**ב.** מה עוצמת שדה הכבידה של הירח על פני הירח?

**ג.** מה עוצמת השדה השקול בנקודה $M$, ולאן הוא מכוון?

**ד.** באיזו נקודה על הקו שמחבר את המרכזים השדה השקול מתאפס? תנו את המרחק שלה ממרכז כדור הארץ.

**ה.** חללית טסה מכדור הארץ לירח לאורך הקו שמחבר ביניהם, ומנועיה כבויים. תארו איך משתנה גודל המהירות שלה במהלך הדרך, ונמקו. חשיבה

---

## שאלה 7

גשושית מתקרבת לכוכב לכת לא מוכר. מתוך מעקב אחרי התנועה שלה מחשבים את עוצמת שדה הכבידה במרחקים שונים ממרכז כוכב הלכת:

| $r\ (10^6\,\mathrm{m})$ | 5 | 6 | 8 | 10 | 12 |
|---|---|---|---|---|---|
| $g\ (\mathrm{N/kg})$ | 1.93 | 1.32 | 0.76 | 0.48 | 0.33 |

**א.** שרטטו גרף של $g$ כפונקציה של $r$. האם אפשר לקבוע רק לפי צורת הגרף אם $g$ הפוך לריבוע המרחק, או למשל הפוך למרחק עצמו? נמקו. חשיבה

**ב.** שרטטו גרף של $g$ כפונקציה של $\frac{1}{r^2}$. מה צורת הגרף, ומה אפשר להסיק ממנה? מצאו את השיפוע של הקו המתאים ביותר. מה המשמעות הפיזיקלית של השיפוע?

**ג.** מה המסה של כוכב הלכת?

**ד.** הגשושית נחתה, ומדדה שהרדיוס של כוכב הלכת הוא $4.0 \times 10^6\,\mathrm{m}$. מה תאוצת הנפילה על פניו, ומה הצפיפות הממוצעת שלו?

**ה.** באיזה מרחק ממרכז כוכב הלכת עוצמת השדה היא $1\%$ מהעוצמה על פניו?

---

## שאלה 8

תחנת חלל נעה במסלול מעגלי בגובה $400\,\mathrm{km}$ מעל פני הארץ.

**א.** מה גודל המהירות של התחנה?

**ב.** מה זמן המחזור שלה, בדקות? כמה הקפות היא משלימה ביממה?

**ג.** מה גודל התאוצה של התחנה? השוו אותו ל־$g_0$.

**ד.** ספינת אספקה מתחברת לתחנה, ומעכשיו הן נעות יחד. האם המערכת, שהמסה שלה גדולה יותר, צריכה מהירות אחרת כדי להישאר באותו מסלול? נמקו. חשיבה

**ה.** אסטרונאוט שמסתו $70\,\mathrm{kg}$ עומד בתחנה על מאזניים. מה גודל כוח הכבידה שכדור הארץ מפעיל עליו? מה מראים המאזניים, ולמה? חשיבה

**ו.** המנוע של התחנה דוחף אותה לזמן קצר בכיוון התנועה, ומגדיל מעט את המהירות שלה. האם התחנה תמשיך לנוע במעגל באותו רדיוס? האם תעבור למעגל אחר? תארו מה יקרה, ונמקו. חשיבה


© אור בן שטרית · אינסוף

## שאלה 9

הלוויינים של מערכת הניווט GPS נעים במסלולים מעגליים, וכל אחד מהם משלים שתי הקפות ביממה.

**א.** מה הרדיוס של מסלול הלוויין, ובאיזה גובה מעל פני הארץ הוא נע?

**ב.** מה גודל המהירות של הלוויין?

**ג.** המסה של הלוויין היא $2000\,\mathrm{kg}$. מה גודל כוח הכבידה שפועל עליו?

**ד.** אות רדיו נע במהירות האור, $3.0\times10^{8}\,\mathrm{m/s}$. לוויין נמצא בדיוק מעל מקלט שעל פני הארץ. כמה זמן לוקח לאות להגיע מהלוויין אל המקלט? המקלט מחשב מרחק לפי זמן ההגעה של האות. איזו טעות במרחק נובעת מטעות של מיליונית שנייה בזמן?

**ה.** זמן המחזור של הירח סביב כדור הארץ הוא $27.3$ ימים. השתמשו בתשובה לסעיף א ובחוק השלישי של קפלר בלבד, בלי $G$ ובלי מסת כדור הארץ, ומצאו את המרחק של הירח ממרכז כדור הארץ. השוו לערך הידוע, $3.84\times10^{8}\,\mathrm{m}$.

---

## שאלה 10

למאדים שני ירחים קטנים. פובוס מקיף אותו במסלול שהרדיוס שלו $9.38\times10^{6}\,\mathrm{m}$, וזמן המחזור שלו $7.65$ שעות. זמן המחזור של דימוס הוא $30.3$ שעות. הרדיוס של מאדים הוא $3.39\times10^{6}\,\mathrm{m}$, ומאדים מסתובב סביב צירו פעם ב־$24.6$ שעות. שני הירחים נעים באותו כיוון שבו מאדים מסתובב.

**א.** מה המסה של מאדים?

**ב.** מה תאוצת הנפילה על פני מאדים?

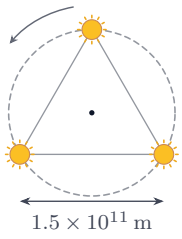
**ג.** מה הרדיוס של המסלול של דימוס?

**ד.** לוויין "סטציונרי" של מאדים נמצא כל הזמן מעל אותה נקודה על פני מאדים. מה הרדיוס של המסלול שלו?

**ה.** צופה על מאדים רואה את דימוס זורח במזרח ושוקע במערב, כמו השמש, אבל את פובוס הוא רואה זורח במערב ושוקע במזרח. הסבירו את ההבדל בעזרת התשובות לסעיפים הקודמים. אתגר חשיבה

---

## שאלה 11 אתגר




שלושה כוכבים זהים, שמסת כל אחד מהם $1.0\times10^{30}\,\mathrm{kg}$, נמצאים בקודקודים של משולש שווה־צלעות. אורך הצלע $1.5\times10^{11}\,\mathrm{m}$. הכוכבים נעים בהשפעת כוחות הכבידה ההדדיים בלבד, במעגל שמרכזו במרכז המשולש, כך שהמשולש מסתובב בלי לשנות את צורתו.

**א.** מה גודל הכוח השקול שפועל על כל כוכב, ולאן הוא מכוון?

**ב.** מה הרדיוס של המעגל שבו נע כל כוכב?

**ג.** מה גודל המהירות של כל כוכב?

**ד.** מה זמן המחזור של התנועה, בימים?

**ה.** מה היה זמן המחזור אילו אורך הצלע היה גדול פי $4$? (הניחו שהכוכבים נעים באותו אופן.)

---


© אור בן שטרית · אינסוף

## שאלה 12

לוויין שמסתו $500\,\mathrm{kg}$ נע במסלול מעגלי שהרדיוס שלו $8.0\times10^{6}\,\mathrm{m}$. בעזרת המנועים שלו מעבירים אותו למסלול מעגלי שהרדיוס שלו $2.4\times10^{7}\,\mathrm{m}$.

**א.** מה האנרגיה הקינטית, האנרגיה הפוטנציאלית והאנרגיה הכוללת של הלוויין במסלול הראשון?

**ב.** מהן שלוש האנרגיות האלה במסלול השני?

**ג.** מה האנרגיה המזערית שהמנועים צריכים לספק כדי להעביר את הלוויין?

**ד.** השוו את השינוי באנרגיה הקינטית של הלוויין לאנרגיה שהמנועים סיפקו. לאן "הלכה" האנרגיה? הראו זאת במספרים. (חשיבה)

**ה.** מה אנרגיית הקשר של הלוויין במסלול השני?

**ו.** כמה אנרגיה, לכל הפחות, היה צריך כדי לשגר את הלוויין מפני הארץ אל המסלול הראשון? (התעלמו מהסיבוב של כדור הארץ.)

---

## שאלה 13

גשושית עתידית נוחתת על כוכב הלכת חמה, שמסתו $3.3\times10^{23}\,\mathrm{kg}$ והרדיוס שלו $2.44\times10^{6}\,\mathrm{m}$. לחמה אין אטמוספרה.

**א.** מה תאוצת הנפילה על פני חמה?

**ב.** מה מהירות המילוט מפני חמה?

**ג.** מהגשושית משגרים מכל קטן אנכית כלפי מעלה, במהירות $2.5\,\mathrm{km/s}$. לאיזה גובה מעל פני חמה יגיע?

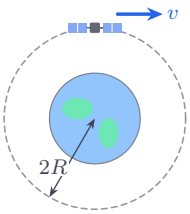
**ד.** תלמיד חישב את הגובה של סעיף ג בנוסחה $h=\frac{v^2}{2g}$. מה קיבל? השוו לתשובה שלכם לסעיף ג. איזו משתי התשובות נכונה, ולמה? (חשיבה)

**ה.** מכל אחר משוגר אנכית במהירות $5.0\,\mathrm{km/s}$. האם הוא יחזור לחמה? אם כן, לאיזה גובה יגיע; אם לא, באיזו מהירות ינוע רחוק מאוד ממנה?

**ו.** כמה אנרגיה, לכל קילוגרם, צריך לתת לגוף שנח על פני חמה כדי לשחרר אותו לגמרי מהכבידה שלה?

---

## שאלה 14 (אתגר)




לוויין שמסתו $900\,\mathrm{kg}$ נע במסלול מעגלי בגובה $6400\,\mathrm{km}$ מעל פני הארץ, כלומר ברדיוס $2R$, כאשר $R$ הוא הרדיוס של כדור הארץ. פיצוץ קצר מאוד מפריד אותו לשני חלקים. החלק האחורי, שמסתו $300\,\mathrm{kg}$, נעצר לרגע מיד אחרי הפיצוץ, והחלק הקדמי, שמסתו $600\,\mathrm{kg}$, ממשיך בכיוון התנועה המקורי.

**א.** מה גודל המהירות של הלוויין לפני הפיצוץ?

**ב.** מה גודל המהירות של החלק הקדמי מיד אחרי הפיצוץ?

**ג.** האם החלק הקדמי יימלט מהכבידה של כדור הארץ? אם כן, באיזו מהירות ינוע רחוק מאוד מכדור הארץ; אם לא, מה יהיה המרחק הגדול ביותר שלו ממרכז כדור הארץ?

**ד.** החלק האחורי נופל אנכית אל כדור הארץ. באיזו מהירות הוא יפגע בפני הארץ? (התעלמו מהאוויר.)

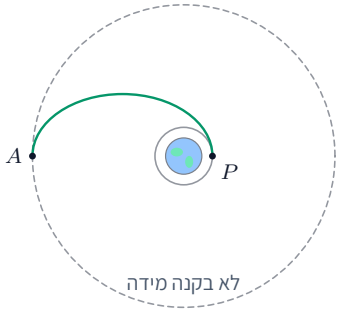
**ה.** כמה אנרגיה הוסיף הפיצוץ לאנרגיה הקינטית של החלקים?

---


© אור בן שטרית · אינסוף

## שאלה 15 מכינה

כדי להעביר לוויין ממסלול נמוך למסלול גאוסטציונרי משתמשים ב**מסלול מעבר** אליפטי. הלוויין נע תחילה במסלול מעגלי שהרדיוס שלו $6.6 \times 10^6\,\mathrm{m}$. בנקודה $P$ המנוע פועל לרגע ומגדיל את מהירותו, והלוויין עובר למסלול אליפטי. הנקודה הרחוקה ביותר באליפסה, $A$, נמצאת במרחק $4.23 \times 10^7\,\mathrm{m}$ ממרכז כדור הארץ. זה הרדיוס של המסלול הגאוסטציונרי. ב־$A$ המנוע פועל שוב, והלוויין עובר למסלול הגאוסטציונרי.




**א.** מה גודל המהירות של הלוויין במסלול המעגלי הנמוך?

**ב.** השתמשו בחוק השני של קפלר ובשימור האנרגיה, ומצאו את המהירות של הלוויין ב־$P$, מיד אחרי פעולת המנוע. בכמה הגדיל המנוע את המהירות?

**ג.** מה המהירות של הלוויין כשהוא מגיע ל־$A$? איך, ובכמה, צריך המנוע לשנות את המהירות שם?

**ד.** כמה זמן נמשכת הדרך מ־$P$ ל־$A$? (היעזרו בחוק השלישי של קפלר, עם חצי הציר הארוך של האליפסה.)

**ה.** מה יקרה ללוויין אם המנוע לא יפעל ב־$A$? חשיבה

# תשובות סופיות

התשובות מעוגלות, וחושבו עם $GM = G \cdot M_E \approx 4.0 \times 10^{14}\,\mathrm{m^3/s^2}$. חישוב עם $g_0 R^2$ נותן הבדלים קטנים בספרה השלישית. הכיוונים מתוארים ביחס לשרטוט או לתיאור שבשאלה.

## שאלה 1

**א.** $\approx 1.2 \times 10^{-7}\,\mathrm{N}$.

**ב.** הכוח קטן פי כ־$6.1 \times 10^{7}$ מהמשקל ($7.35\,\mathrm{N}$).

**ג.** $\approx 3.0 \times 10^{-8}\,\mathrm{N}$, קטן פי $4$.

**ד.** $\approx 1.2 \times 10^{-7}\,\mathrm{N}$, אל הכדור הקטן.
תאוצת הכדור הקטן $\approx 1.6 \times 10^{-7}\,\mathrm{m/s^2}$.
תאוצת הכדור הגדול $\approx 8.0 \times 10^{-10}\,\mathrm{m/s^2}$.

**ה.** $t = \sqrt{\frac{2d}{a}} \approx 112\,\mathrm{s}$, כשתי דקות.

**ו.** $\approx 2.7 \times 10^{-6}\,\mathrm{N}$. הכוח זעיר לעומת החיכוך הסטטי המרבי בין הצמיגים לכביש (אלפי ניוטונים), והחיכוך מאזן אותו בקלות.

## שאלה 2

**א.** $\approx 2.0 \times 10^{20}\,\mathrm{N}$.

**ב.** $\approx 4.4 \times 10^{20}\,\mathrm{N}$. השמש מושכת חזק יותר, פי כ־$2.2$.

**ג.** $\approx 4.8 \times 10^{20}\,\mathrm{N}$, בזווית של $\approx 25^\circ$ מהכיוון אל השמש, לעבר כדור הארץ.

**ד.** במולד $\approx 2.4 \times 10^{20}\,\mathrm{N}$, אל השמש. בירח מלא $\approx 6.4 \times 10^{20}\,\mathrm{N}$, אל השמש (וגם אל כדור הארץ).

**ה.** השמש מקנה לכדור הארץ ולירח כמעט אותה תאוצה, כ־$5.9 \times 10^{-3}\,\mathrm{m/s^2}$, כי הם נמצאים כמעט באותו מרחק ממנה. שניהם "נופלים" יחד סביב השמש, והתנועה של הירח ביחס לכדור הארץ נקבעת בעיקר על ידי המשיכה של כדור הארץ.

## שאלה 3

**א.** הירחים מקיפים את צדק, ולא את הארץ. לכן לא כל גרמי השמיים מקיפים את הארץ, ואין סיבה שהיא תהיה המרכז.

**ב.** לאיו כ־$0.0417$, לקליסטו כ־$0.0420$ (ימים בריבוע ל־$(10^8\,\mathrm{m})^3$). כמעט שווים: החוק השלישי של קפלר מתקיים גם לירחים של צדק.

**ג.** לאירופה כ־$3.55$ ימים. לגנימד כ־$1.07 \times 10^{9}\,\mathrm{m}$.

**ד.** $\approx 1.9 \times 10^{27}\,\mathrm{kg}$, פי כ־$317$.

**ה.** $\left(\frac{4.22}{3.84}\right)^3 \left(\frac{27.3}{1.77}\right)^2 \approx 316$.

## שאלה 4

**א.** המהירות הגדולה ביותר בנקודה הקרובה לשמש, והקטנה ביותר ברחוקה. בזמנים שווים הקו שמחבר את השביט לשמש סורק שטחים שווים, וכשהקו קצר, השביט צריך לעבור קשת ארוכה יותר.

**ב.** $\approx 0.92\,\mathrm{km/s}$.

**ג.** $r = \frac{0.59+35.1}{2} \approx 17.85\,\mathrm{AU}$, ולכן $T = r^{3/2}$, כלומר כ־$75.4$ שנים.

**ד.** ב־$2061$.

**ה.** פי $\left(\frac{35.1}{0.59}\right)^2$, כלומר פי כ־$3540$.

## שאלה 5

**א.** בכ־$0.34\%$. בגובה של כ־$32\,\mathrm{km}$.

**ב.** $\approx 10.3\,\mathrm{m/s^2}$.

**ג.** $g \propto \frac{M}{R^2}$: המסה גדולה פי $95$, אבל $R^2$ גדול פי $90$, ולכן ההשפעות כמעט מתקזזות. לשבתאי צפיפות קטנה בהרבה מזו של כדור הארץ.

**ד.** $2g_0 \approx 19.6\,\mathrm{m/s^2}$.

**ה.** $0.25\,\mathrm{m}$.

## שאלה 6

**א.** $\approx 2.7 \times 10^{-3}\,\mathrm{N/kg}$, אל מרכז כדור הארץ.

**ב.** $\approx 1.63\,\mathrm{N/kg}$.

**ג.** $\approx 1.07 \times 10^{-2}\,\mathrm{N/kg}$, אל כדור הארץ.

**ד.** $\approx 3.46 \times 10^{8}\,\mathrm{m}$, $0.9$ מהמרחק בין המרכזים.

**ה.** עד נקודת האפס השדה השקול פונה אל כדור הארץ, נגד כיוון התנועה, והחללית מאטה. אחרי הנקודה השדה פונה אל הירח, והחללית מאיצה. (היא צריכה מהירות מספיקה כדי להגיע לנקודה הזו.)

## שאלה 7

**א.** לא. מתקבלת עקומה יורדת, אבל גם תלות של $\frac{1}{r}$ וגם של $\frac{1}{r^2}$ נותנות עקומות יורדות דומות, וקשה להבחין ביניהן בעין.

**ב.** קו ישר בקירוב, שעובר בראשית: $g$ הפוך לריבוע המרחק. השיפוע הוא $GM$, והוא $4.8 \times 10^{13}\,\mathrm{N \cdot m^2/kg}$־כ.

**ג.** $\approx 7.2 \times 10^{23}\,\mathrm{kg}$.

**ד.** $\approx 3.0\,\mathrm{m/s^2}$־ו, $\rho \approx 2.7 \times 10^{3}\,\mathrm{kg/m^3}$.

**ה.** $4.0 \times 10^{7}\,\mathrm{m}$, פי $10$ מהרדיוס.

## שאלה 8

**א.** $\approx 7.67\,\mathrm{km/s}$.

**ב.** כ־$92.8$ דקות, וכ־$15.5$ הקפות ביממה.

**ג.** $\approx 8.65\,\mathrm{m/s^2}$, כ־$88\%$ מ־$g_0$.

**ד.** לא. $v = \sqrt{\frac{GM}{r}}$ לא תלויה במסה של הגוף שנע במסלול.

**ה.** $\approx 606\,\mathrm{N}$. המאזניים מראים אפס: האסטרונאוט והתחנה נופלים יחד באותה תאוצה, ולכן הרצפה לא דוחפת אותו.

**ו.** לא ולא. במהירות הגדולה יותר הכבידה קטנה מהכוח המרכזי שדרוש למעגל ברדיוס הזה, והתחנה מתרחקת. היא עוברת למסלול אליפטי, שהנקודה הקרובה ביותר בו היא הנקודה שבה פעל המנוע.

### שאלה 9

**א.** $\approx 2.66 \times 10^7\ \text{m}$, בגובה של כ־$20\,200\ \text{km}$.

**ב.** $\approx 3.88\ \text{km/s}$.

**ג.** $\approx 1.13 \times 10^3\ \text{N}$.

**ד.** $\approx 0.0675\ \text{s}$. טעות של $300\ \text{m}$.

**ה.** $2.66 \times 10^7 \cdot 54.6^{2/3} \approx 3.83 \times 10^8\ \text{m}$, קרוב מאוד לערך הידוע.

### שאלה 10

**א.** $\approx 6.4 \times 10^{23}\ \text{kg}$.

**ב.** $\approx 3.7\ \text{m/s}^2$.

**ג.** $\approx 2.35 \times 10^7\ \text{m}$.

**ד.** $\approx 2.04 \times 10^7\ \text{m}$.

**ה.** פובוס נמצא מתחת למסלול הסטציונרי, ולכן מקיף את מאדים מהר יותר משמאדים מסתובב. הוא "עוקף" את הצופה, ולכן נראה נע ממערב למזרח. דימוס נמצא מעל המסלול הסטציונרי, ומקיף את מאדים לאט יותר משמאדים מסתובב. הצופה "עוקף" אותו, ולכן הוא נראה נע ממזרח למערב, כמו השמש.

### שאלה 11

**א.** $\sqrt{3}\,\frac{GM^2}{a^2} \approx 5.1 \times 10^{27}\ \text{N}$, אל מרכז המשולש ($a$ הוא אורך הצלע).

**ב.** $\frac{a}{\sqrt{3}} \approx 8.66 \times 10^{10}\ \text{m}$.

**ג.** $\sqrt{\frac{GM}{a}} \approx 2.1 \times 10^4\ \text{m/s}$.

**ד.** כ־$299$ ימים.

**ה.** גדול פי $4^{3/2} = 8$: כ־$2390$ ימים, כלומר כ־$6.5$ שנים.

### שאלה 12

**א.**
$E_k \approx 1.25 \times 10^{10}\ \text{J}$
$U \approx -2.50 \times 10^{10}\ \text{J}$
$E \approx -1.25 \times 10^{10}\ \text{J}$

**ב.**
$E_k \approx 4.17 \times 10^9\ \text{J}$
$U \approx -8.34 \times 10^9\ \text{J}$
$E \approx -4.17 \times 10^9\ \text{J}$

**ג.** $\approx 8.34 \times 10^9\ \text{J}$.

**ד.** $E_k$ קטנה בכ־$8.34 \times 10^9\ \text{J}$, בדיוק כמו האנרגיה שהמנועים סיפקו. $U$ גדלה בכ־$1.67 \times 10^{10}\ \text{J}$, פי 2: חצי מהעלייה שלה בא מהמנועים, וחצי מהאנרגיה הקינטית.

**ה.** $\approx 4.17 \times 10^9\ \text{J}$.

**ו.** $\approx 1.88 \times 10^{10}\ \text{J}$.

### שאלה 13

**א.** $\approx 3.7\ \text{m/s}^2$.

**ב.** $\approx 4.25\ \text{km/s}$.

**ג.** $\approx 1.29 \times 10^6\ \text{m}$, כ־$1290\ \text{km}$.

**ד.** כ־$845\ \text{km}$. התשובה של סעיף ג נכונה: הנוסחה מניחה $g$ קבוע, אבל בגובה כזה $g$ קטן בהרבה, ולכן המכל מגיע גבוה יותר.

**ה.** לא יחזור, כי $5.0 > 4.25$. רחוק מאוד מחמה המהירות שלו כ־$2.64\ \text{km/s}$.

**ו.** $\frac{GM}{R} \approx 9.0 \times 10^6\ \text{J/kg}$.

### שאלה 14

**א.** $\approx 5.59\ \text{km/s}$.

**ב.** $\approx 8.39\ \text{km/s}$, פי $1.5$.

**ג.** כן. מהירות המילוט ברדיוס $2R$ היא כ־$7.91\ \text{km/s}$. רחוק מאוד המהירות שלו כ־$2.8\ \text{km/s}$.

**ד.** $\approx 7.91\ \text{km/s}$ (במקרה, בדיוק מהירות המילוט ברדיוס $2R$).

**ה.** $\approx 7.0 \times 10^9\ \text{J}$.

### שאלה 15

**א.** $\approx 7.79\ \text{km/s}$.

**ב.** $\approx 10.24\ \text{km/s}$, תוספת של כ־$2.46\ \text{km/s}$.

**ג.** $\approx 1.60\ \text{km/s}$. במסלול הגאוסטציונרי צריך $\approx 3.08\ \text{km/s}$, ולכן המנוע צריך להגדיל את המהירות בכ־$1.48\ \text{km/s}$.

**ד.** כ־$5.3$ שעות.

**ה.** הלוויין יישאר במסלול האליפטי: יחזור ל־$P$, ויעבור ב־$A$ פעם בכל הקפה, כל כ־$10.5$ שעות.

© 2026 אור בן שטרית · אינסוף. כל הזכויות שמורות.
מותר להדפיס ולהפיץ את הקובץ בשלמותו ובחינם לצורכי לימוד. אסור להעתיק ממנו תרגילים או איורים לחומרים אחרים, לשנות אותו או להשתמש בו למטרות מסחריות בלי אישור בכתב.
הקובץ נכתב בידי אינסוף ואינו פרסום רשמי של משרד החינוך או של גוף אחר.