

מכניקה

חוק הכבידה העולמי

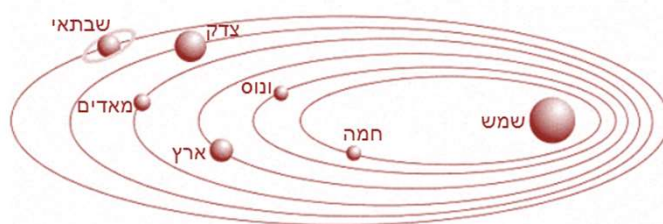


- ◀ חוק הכבידה העולמי
- ◀ תאוצת הכובד במרחק r ממרכזו של כוכב
- ◀ תנועת לוויינים
- ◀ תחושת "חוסר משקל" במעבורות חלל
- ◀ תופעת גאות ושפל

תזכורת: שלושת חוקי קפלר

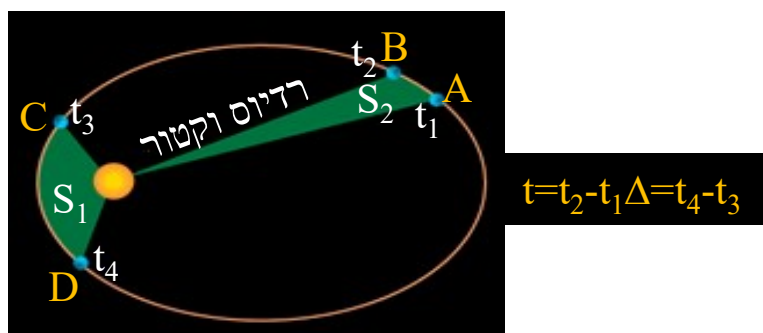
החוק הראשון של קפלר

כוכבי הלכת נעים סביב השמש במסלול אליפטי, שהשמש נמצאת באחד ממוקדיו.



החוק השני של קפלר (חוק השטחים)

הרדיוס-וקטור (הישר המחבר בין השמש לכוכב לכת) מכסה במהלך תנועתו של כוכב הלכת שטחים שווים בפרקי זמן שווים.



החוק השלישי של קפלר (חוק המחזורים) (1618)

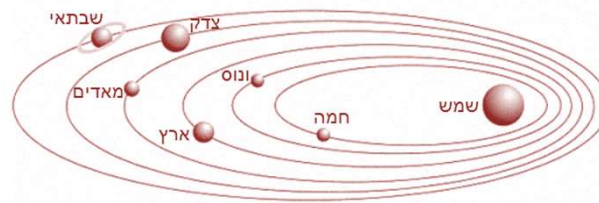
ריבוע זמן המחזור (T) של כוכב לכת בתנועתו סביב השמש הינו ביחס ישר לחזקה השלישית של מרחקו הממוצע מן השמש (R).

$$T^2 = kR^3$$

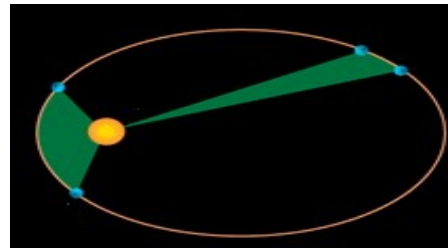
$$\left(\frac{T_1}{T_2}\right)^2 = \left(\frac{R_1}{R_2}\right)^3$$

ההסבר של ניוטון לחוקי קפלר

אחרי פרסום חוקי קפלר, עמדה השאלה: מדוע כוכבי הלכת נעים לפי חוקים אלו?
למה דווקא אליפטיות? (חוק קפלר הראשון)



מדוע התנועה של כל כוכב לכת אינה קצובה, כלומר משתנה בנקודות המסלול שלו? (חוק קפלר השני)



מהו ההסבר לכך שבין כל כוכבי הלכת, הרחוקים מאוד זה מזה, מתקיים קשר מתמטי מוגדר ביחס לזמני המחזור שלהם ולמרחקים הממוצע מהשמש. (חוק קפלר השלישי).

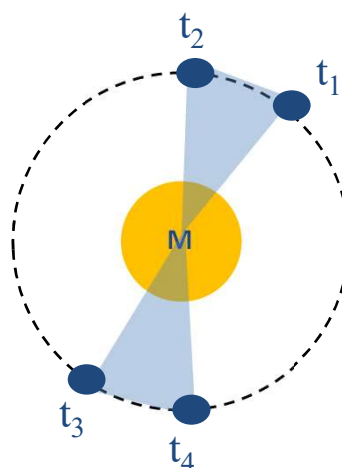
$$T^2 = kR^3$$

$$\left(\frac{T_1}{T_2}\right)^2 = \left(\frac{R_1}{R_2}\right)^3$$



מפתיע שאותו קשר מתמטי בין המרחק הממוצע מן השמש לבין זמן המחזור מתקיים עבור כל כוכבי הלכת במערכת!

ניוטון הבין שהעובדה שכוכב לכת אינו נע בקו ישר, מוכיחה שפועל עליו כוח. מניין מגיע כוח זה? לשם פשטות הדיון נניח שמסלול כוכב לכת הינו מעגלי. למעשה חוקי קפלר מתאימים לכל מסלול אליפטי, פחוס יותר או פחות. מסלול מעגלי הינו מקרה פרטי של אליפסה לכן ההנחה מותרת. חייב לפעול כוח על כוכב לכת כדי שינוע במעגל, כפי שקורה בכל תנועה מעגלית. מהחוק השני, חוק השטחים, נובע כי אם המסלול מעגלי, הכוכב נע בתנועה קצובה. (שטחים שווים ורדיוסים שווים לכן מהירות שווה).



$$t = t_2 - t_1 = t_4 - t_3$$

חוק הכבידה העולמי

בתנועה מעגלית, הכוח חייב לפעול בכיוון המרכז, לכן הכוח חייב לפעול בכיוון השמש.

מהחוק השני של ניוטון לתנועה מעגלית :

$$F = \frac{m \cdot v^2}{r}$$

אבל:

$$v = \frac{2 \cdot \pi \cdot r}{T}$$

ומהחוק שלישי של קפלר:

$$\frac{T^2}{r^3} = k$$

נקבל:

$$F = \frac{m \cdot \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot r}{T}\right)^2}{r} = \frac{4 \cdot \pi^2 \cdot m \cdot r^2}{T^2 \cdot r} = \frac{4 \cdot \pi^2 \cdot m \cdot r^2}{k \cdot r^3 \cdot r} = \frac{4 \cdot \pi^2 \cdot m}{k \cdot r^2}$$

$$F = \frac{4 \cdot \pi^2}{k} \cdot \frac{m}{r^2}$$

זהו גודל הכוח הפועל על כוכב הלכת, על מנת שינוע במסלולו הסגור.

ניוטון הניח, שהשמש הינה מקור כוח מרכזי זה, שגודלו ביחס הפוך לריבוע המרחק בין כוכב הלכת לבין השמש.

כוח זה ידוע בשם **כוח הכבידה**.

חוק הכבידה העולמי

כוח כזה פועל גם במערכות כוכבים או גופים שמימיים אחרים,
רק גודל הקבוע k יהיה שונה.

$$F = \frac{4 \cdot \pi^2}{k} \cdot \frac{m}{r^2}$$

כוח הכבידה שהשמש מפעילה על כוכב לכת הינו ביחס ישר למסת כוכב הלכת.
מהחוק השלישי של ניוטון מתקבל שכוכב הלכת מושך את השמש באותו כוח שהיא מושכת אותו.

כוח זה חייב להיות גם ביחס ישר למסת השמש.

$$\frac{4 \cdot \pi^2}{k} = G \cdot M$$

לכן בגורם k חייבת להופיע מסת השמש.

מקובל לרשום:

$$F = \frac{GMm}{r^2}$$

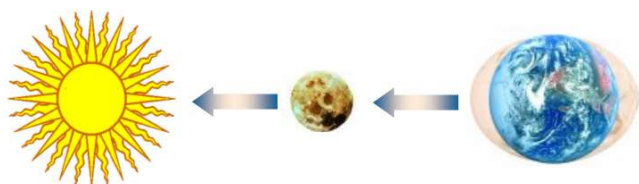
כאשר M מסת השמש ו- G קבוע. לכן:

.

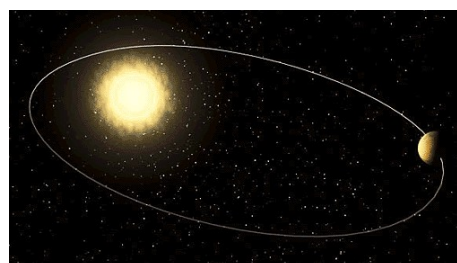
חוק הכבידה העולמי

כאמור, כוח הכבידה קיים גם במערכות כוכבים או בין גופים שמימיים אחרים. ניוטון, באינטואיציה מדהימה, טען שכוח זה פועל גם בין כל שתי מסות בטבע! לכן כוח הכבידה הצליח להסביר הרבה מתופעות הטבע כמו:

גאות ושפל



תנועת ירחים וכוכבי לכת

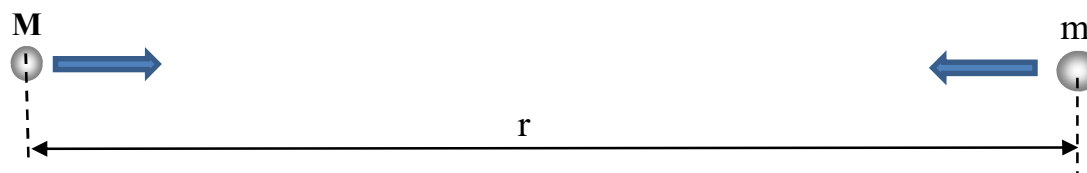


נפילת גופים אל כדור הארץ



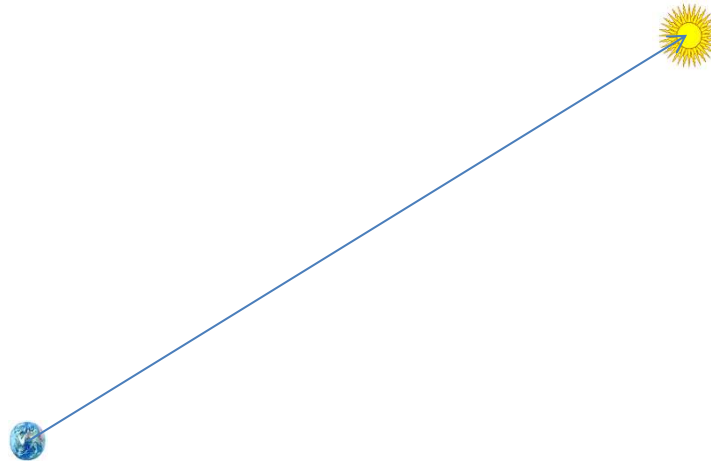
על כן, מן הראוי לכנותו בשם כוח הכבידה העולמי (אוניברסלי) והקבוע G ייקרא קבוע הכבידה העולמי.
ניוטון הצליח לנסח בצורה פשוטה את החוק הזה:

בין כל שתי מסות נקודתיות פועל, לאורך הישר המחבר ביניהן, כוח משיכה הדדי, שהינו ביחס ישר למסות החלקיקים וביחס הפוך לריבוע המרחק ביניהם.

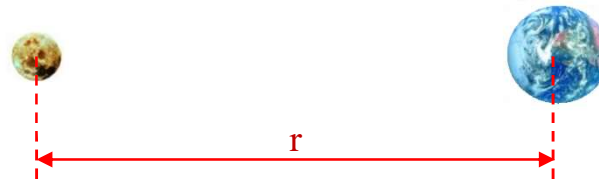


חוק הכבידה העולמי, המשך

ניסחנו את חוק הכבידה עבור שתי מסות נקודתיות, אך בגילוי חוק הכבידה הסתמך ניוטון על הכוח הפועל בין השמש לכוכבי הלכת, שאינם נקודתיים! האם אין כאן סתירה?
המרחק בין השמש לכדור הארץ למשל, הינו 150 מיליון ק"מ ורדיוס השמש הינו 700,000 ק"מ, כלומר פחות מחצי אחוז מהמרחק בין השמש לכדור הארץ. לכן בהחלט ניתן להתייחס במצב זה לשמש כגודל נקודתי.



ככלל בחישוב כוח הכבידה הפועל מחוץ לגופים כדוריים, כמו כוכבים, כוכבי לכת וירחים, ניתן להתייחס למסה כאילו מרוכזת במרכז הכוכב.



חוק הכבידה העולמי

הניסוח המתמטי של חוק הכבידה העולמי, שהוא **חוק טבע** חשוב ביותר אותו גילה וניסח ניוטון במאה ה-17:

$$F_G = G \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}$$

◀ F_G – כוח הכבידה הפועל בין שני גופים, ביחידות ניוטון.

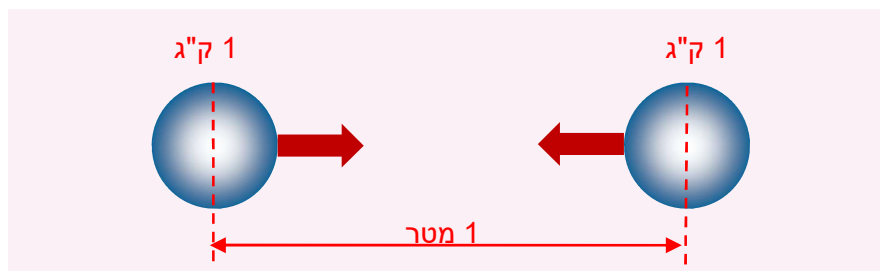
◀ m_1, m_2 – מסות הגופים ביחידות קילוגרם.

◀ r – המרחק בין הגופים ביחידות מטר.

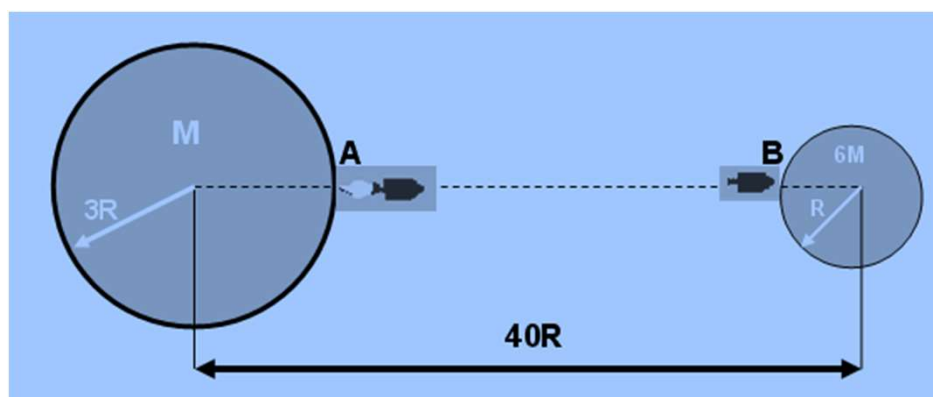
◀ G – קבוע משיכה עולמי, ערכו וממדיו הם:

$$G = 6.67 \cdot 10^{-11} \frac{N \cdot m^2}{C^2}$$

הערך המספרי של הקבוע G מתקבל ככוח המשיכה ההדדי, הפועל על כל אחד משני גופים בעלי מסה של 1 ק"ג, שמרכזיהם מצויים במרחק 1 מטר זה מזה.



מרכזיהם של שני כוכבים כדוריים נמצאים במרחק $40R$ זה מזה.
מסת אחד הכוכבים היא M ורדיוסו $3R$, מסת הכוכב השני היא $6M$ ורדיוסו R .
מסת הטיל היא m . (ראה תרשים).
נתונים: G, R, M, m

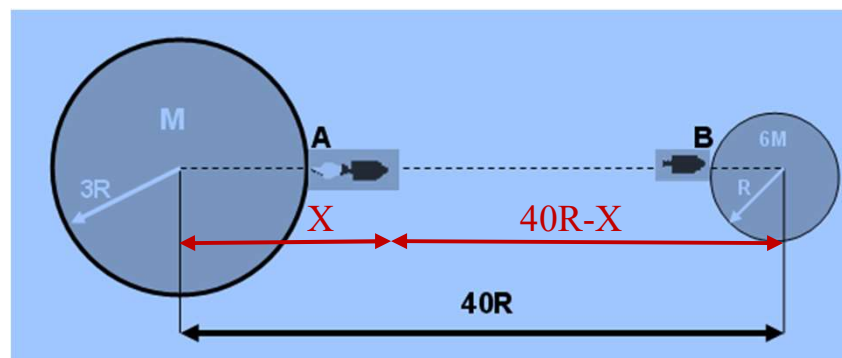


באיזה מרחק מהכוכב שמסתו M (על קו ישר שבין מרכזי שני הכוכבים) יהיה כוח הכבידה השקול הפועל על הטיל שווה לאפס?

.א

$$\frac{G \cdot M_1 \cdot m'}{r_1^2} = \frac{G \cdot M_2 \cdot m'}{r_2^2}$$

$$\frac{G \cdot M \cdot m'}{(X)^2} = \frac{G \cdot 6M \cdot m'}{(40R - X)^2}$$



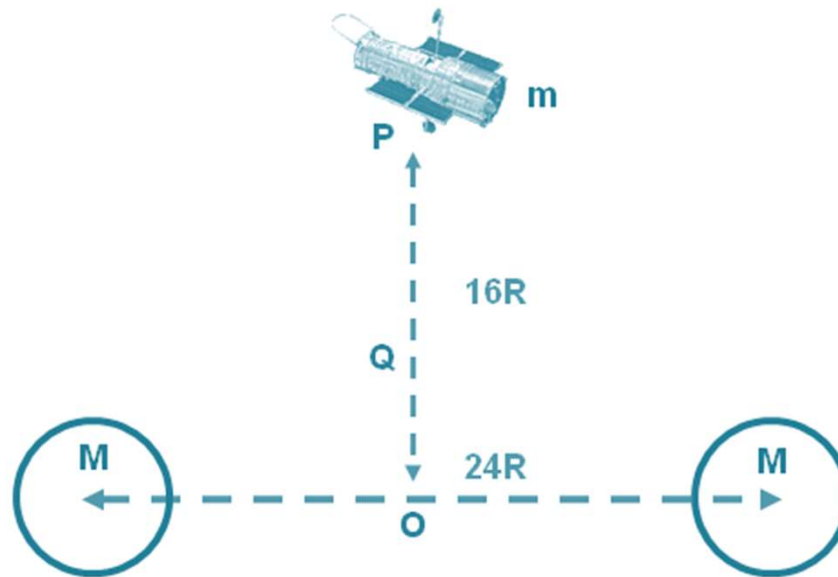
$$\frac{(40R - X)^2}{(X)^2} = 6$$

$$\frac{(40R - X)}{(X)} = \sqrt[2]{6} \Rightarrow X = 11.59R$$

חללית שמסתה m נעה (בהשפעת כוחות הכבידה בלבד) לאורך האנך המרכזי לקטע המחבר את מרכזי שני כוכבים זהים, שמסתם M ורדיוס כל אחד מהם הוא R . הכוכבים נמצאים במרחק $24R$ זה מזה וקבועים במקומם.

נתונים: m, M, R, G .

החללית מתחילה לנוע ממנוחה מהנקודה P הנמצאת במרחק $16R$ מהנקודה O .



- מה גודלו וכיוונו של הכוח השקול הפועל על החללית ברגע בו היא מתחילה את תנועתה בנקודה P ?
- מה גודלו וכיוונו של הכוח השקול הפועל על החללית ברגע בו היא עוברת דרך הנקודה O ?

א.

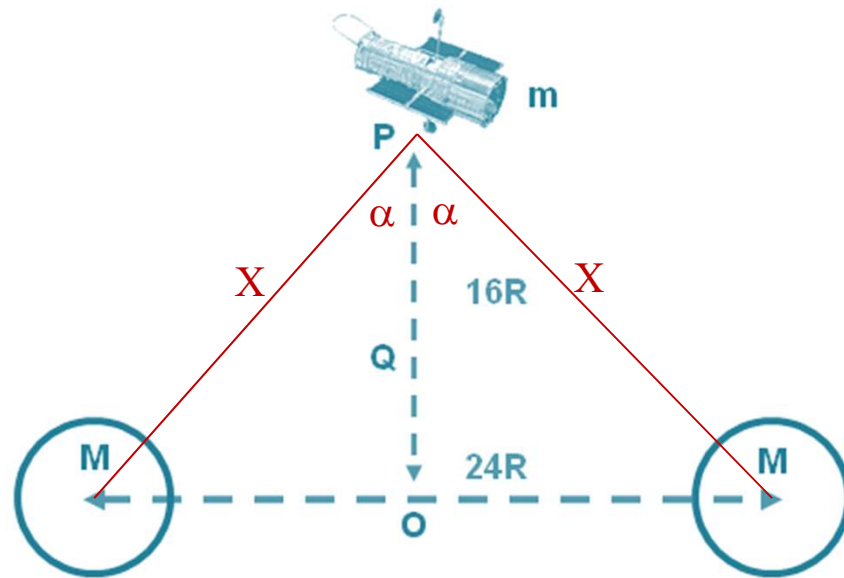
$$\sum F_y = 2 \cdot \frac{G \cdot M \cdot m}{(X)^2} \cdot \cos \alpha$$

$$X^2 = (12R)^2 + (16R)^2$$

$$X = 20R$$

$$\cos \alpha = \frac{16R}{20R} = 0.8$$

$$\alpha = 37^\circ$$



$$\sum F_y = 2 \cdot \frac{G \cdot M \cdot m}{(20R)^2} \cdot 0.8 = 0.004 \frac{G \cdot M \cdot m}{R^2}$$

ב. אפס

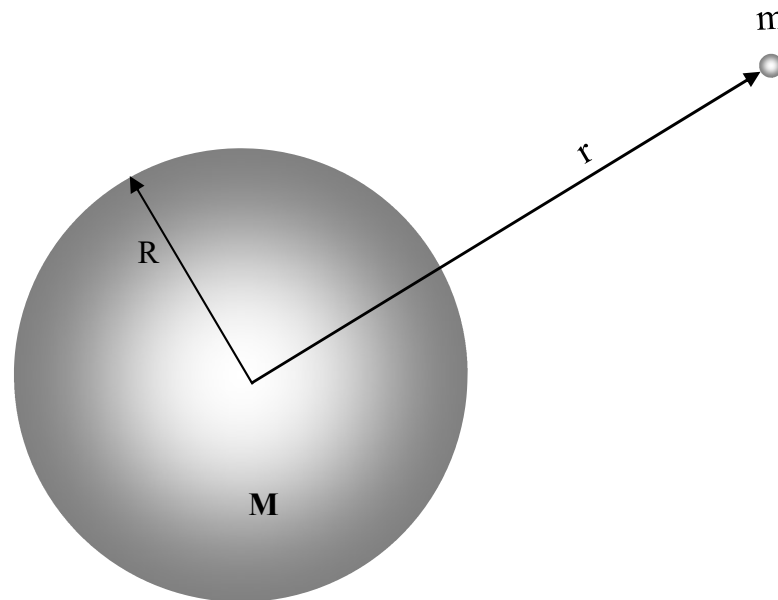
תאוצת הכובד במרחק r ממרכזו של כוכב

את תאוצת הכובד במרחק r ממרכזו של כוכב ($r > R$) ניתן למצוא בעזרת החוק השני של ניוטון:

$$\sum \vec{F} = m\vec{a}$$

$$\frac{GMm}{r^2} = ma \Rightarrow a = g^*$$

$$g^* = \frac{GM}{r^2}$$



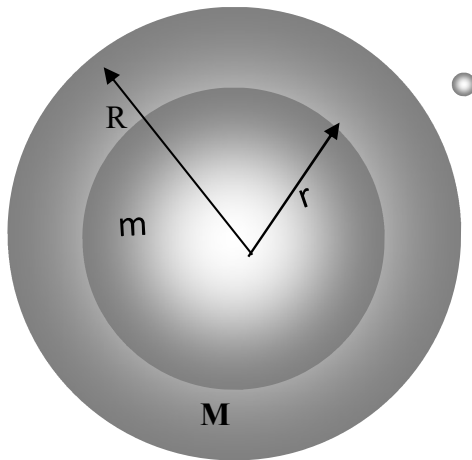
תאוצת הכובד במרחק r ממרכזו של כוכב

כאשר ($r < R$)

תאוצת הכובד בתוך כוכב תלויה כמוהו במרחק ממרכז הכוכב, ונקבעת על פי המסה של הכוכב עד לנקודה בה מחשבים את התאוצה, כלומר מסת הכדור שרדיוסו r .

נניח שהמסה בכוכב מחולקת בצפיפות אחידה. נסמן: $-V$ – נפח כל הכוכב שרדיוסו R ו- M שמסתו, וב- V' – נפח כדור פנימי שמסתו m ורדיוסו r .

הביטוי לצפיפות:



$$\rho = \frac{m}{V'} = \frac{m}{\frac{4}{3}\pi r^3}$$

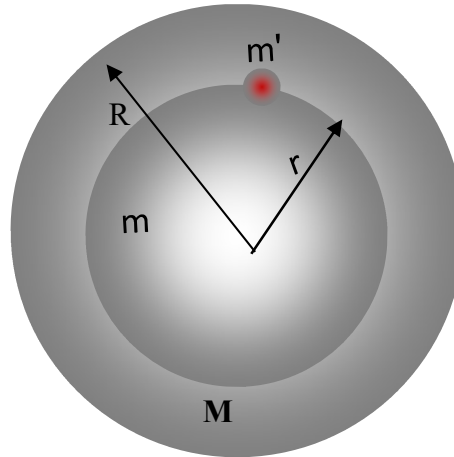
$$\rho = \frac{M}{V} = \frac{M}{\frac{4}{3}\pi R^3}$$

מהשוואת הביטויים נקבל:

$$\frac{M}{\frac{4}{3}\pi R^3} = \frac{m}{\frac{4}{3}\pi r^3}$$

$$m = \frac{r^3}{R^3} \cdot M$$

תאוצת הכובד במרחק r ממרכזו של כוכב



$$\sum \vec{F} = m' \vec{a}$$

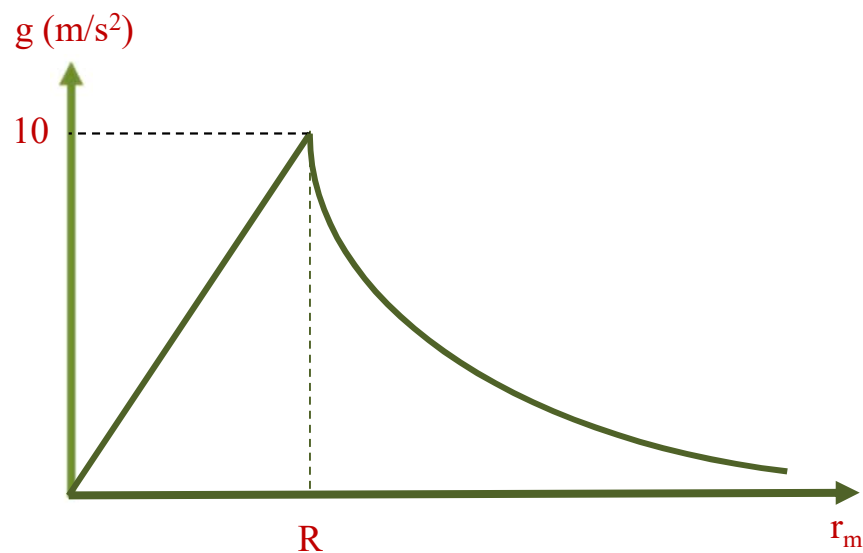
$$\frac{Gmm'}{r^2} = m' a \Rightarrow a = g^*$$

$$G \frac{\frac{r^3}{R^3} M \cdot m'}{r^2} = m' \cdot g^*$$

$$g^* = \frac{GM}{R^3} \cdot r$$

תיאור גרפי: תאוצת הכובד בתלות במרחק ממרכז הכובד

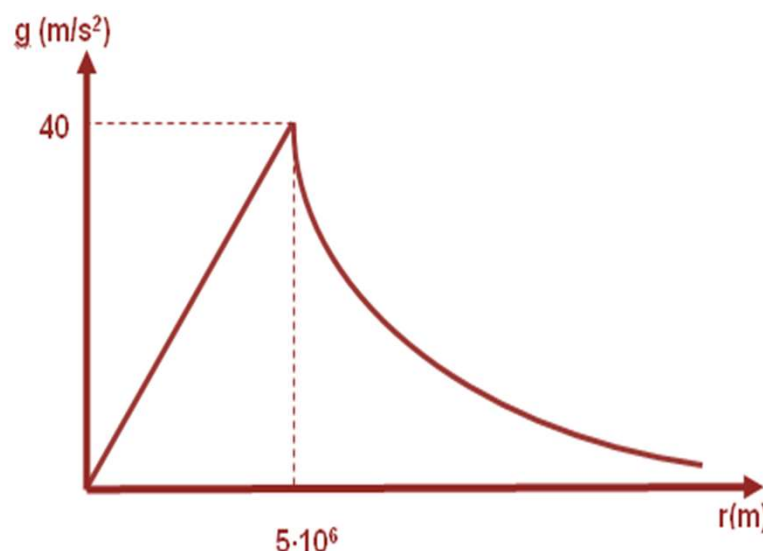
מסקנות:



1. ממרכז הכובד ועד לפני הכובד תאוצת הכובד גדלה, ונמצאת ביחס ישר למרחק ממרכז הכובד.

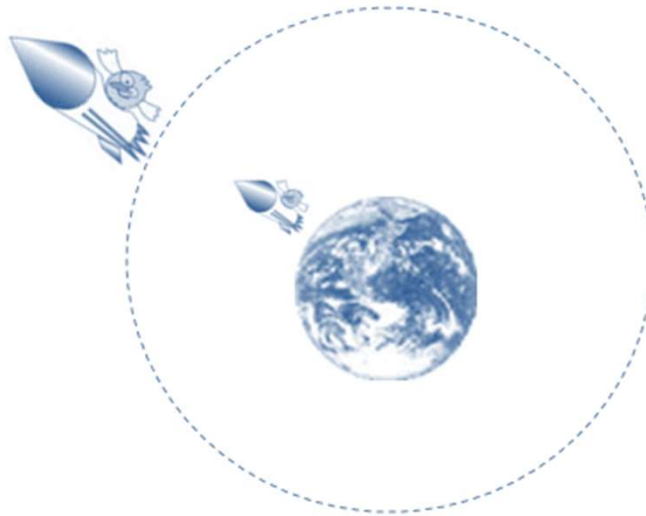
2. במרחקים הגדולים מרדיוס הכובד תאוצת הכובד קטנה, ונמצאת ביחס הפוך לריבוע המרחק ממרכז הכובד.

הגרף שלפניך מתאר את תאוצת הכובד כפונקציה של המרחק ממרכז כוכב לכת דמיוני בעל צפיפות אחידה.



- מהו רדיוס הכוכב ומהי מסתו?
- מהי צפיפות המסה של הכוכב?
- הוכח ששיפוע הגרף (בקטע בו הוא קבוע), המבוטא ע"י היחס g/r שווה ל- $G \cdot M/R^3$.
- משחררים גוף ממנוחה מנקודה הנמצאת בגובה $2R$ (רדיוס הכוכב) מעל פני הכוכב.
- הערך את משך נפילת הגוף מרגע שחרורו עד רגע פגיעתו בפני כוכב הלכת באמצעות קביעת גבול עליון וגבול תחתון עבור משך הנפילה.

טיל שמסתו $m=2000 \text{ kg}$ שוגר מפני כדור הארץ ממנוחה בכיוון אנכי. הטיל עלה בתאוצה קבועה, ובהגיעו כעבור 2 דקות לגובה של 180 km מעל פני כדור הארץ אזל הדלק במכלי הטיל.



- א. מה הייתה תאוצתו של הטיל בזמן שיגורו?
- ב. מהי תאוצת הנפילה החופשית בגובה שבו אזל הדלק במכלי הטיל?

א.

$$x_t = x_0 + v_0 t + \frac{at^2}{2}$$

$$180000 = 0 + 0 + \frac{a \cdot 120^2}{2}$$

$$a = 25 \frac{m}{\text{sec}^2}$$

ב.

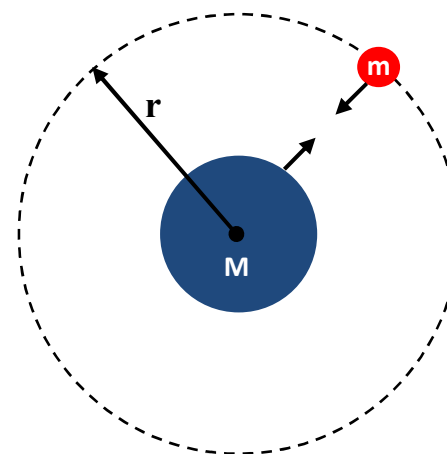
$$\sum F^p = ma^p$$

$$\frac{GMm}{r^2} = ma \Rightarrow a = g^*$$

$$g^* = \frac{GM}{r^2} = \frac{GM}{(R_E + x)^2}$$

בתנועת לוויין רק כוח המשיכה של הארץ משמש ככוח צנטריפטלי המאלץ את הלוויין לנוע במסלול מעגלי לכן:

$$\begin{aligned} F_R^p &= m a_R^p \\ F_R^p &= m \frac{v^2}{R} \\ \frac{GMm}{r^2} &= m \frac{v^2}{r} \\ v &= \sqrt{\frac{GM}{r}} \end{aligned}$$



כדי שהגוף הקטן יוכל לנוע במסלול מעגלי סביב המסה M, יש לתת לגוף m מהירות משיקית מסוימת. עבור כל מרחק בין מרכזי המסות ישנה **מהירות אחת ויחידה**, שאיתה תמשיך המסה m לנוע במסלול מעגלי סביב M. כיוונה של מהירות זו הוא, כאמור, **משיק** למסלול. בתנועה דומה לזו נעים (במסלולים מעגליים בקירוב) כוכבי הלכת סביב השמש, הירחים סביב כוכבי הלכת ולוויינים מלאכותיים סביב כדור הארץ.

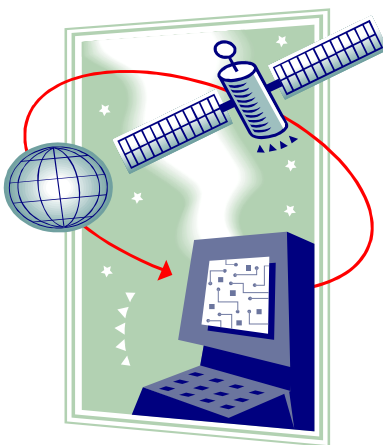
שאלה: לוויין נשאר מעל נקודה קבועה על פני כדור הארץ. מהו זמן המחזור שלו ?

מסלול גאו-סטציונרי

רוב לווייני התקשורת נעים במסלול סביב כדור הארץ, כשהם מצויים מעל נקודה קבועה ביחס אליו. מסלול כזה נקרא **מסלול גאו-סטציונרי** (גאו=אדמה, סטציונרי=קבוע) והוא בגובה של כ- 35,786 ק"מ מעל פני כדור הארץ.

כל לוויין כזה משלים הקפה סביב כדור הארץ ב-24 שעות. תכונה זו מאפשרת להעביר שירותי תקשורת לאזורים מוגדרים על פני הארץ לאנטנות, המכוונות לנקודה ספציפית בחלל.

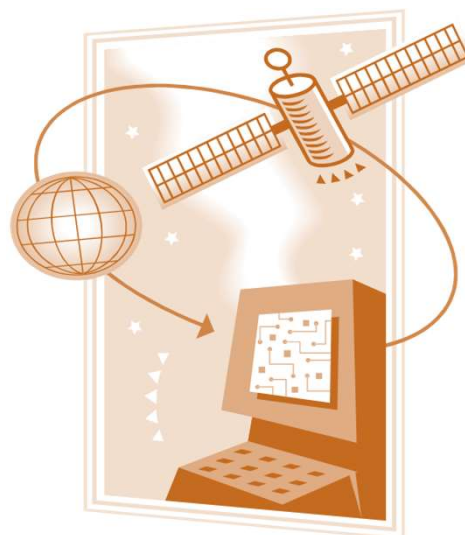
בניגוד אליהם ישנם מספר לווייני תקשורת ולווייני ריגול, המוצבים ופועלים במסלולים בגובה מספר מאות קילומטר מעל פני הקרקע. לוויינים אלו מקיפים את כדור הארץ מספר פעמים ביום ואינם נמצאים מעל נקודה קבועה.



http://www.youtube.com/watch?feature=player_detailpage&v=sj7zsGkpZxg

<http://www.dnatube.com/video/11779/Applications-Of-Artificial-Satellites>

לוויין שמסתו 150 kg מסתובב מעל נקודה קבועה בקו המשווה.



- א. מהו זמן המחזור של הלוויין?
- ב. מהו הרדיוס של מסלול הלוויין?
- ב. מהי המהירות המשקית של הלוויין?

פתרון תרגיל 5

א. הלוויין נע במסלול גאוסטציונרי. לווין כזה משלים הקפה סביב כדור הארץ ב-24 שעות.

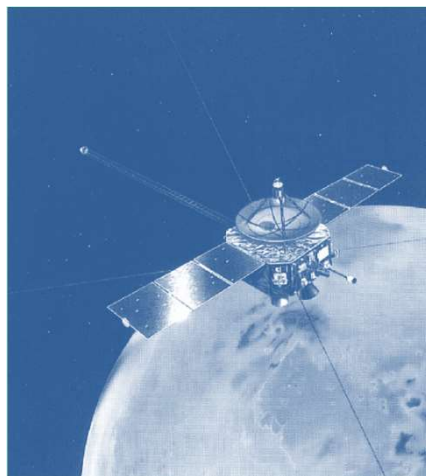
ב.

$$\frac{G \cdot M_E \cdot m}{r^2} = \frac{m \left(\frac{2\pi r}{T} \right)^2}{r} \Rightarrow r = \sqrt[3]{\frac{G \cdot M_E \cdot T^2}{4\pi^2}}$$

ג.

$$v = \frac{2 \cdot \pi \cdot r}{T}$$

לווין מקיף כוכב לכת מסוים סמוך מאוד לפניו. רדיוס הכוכב R וצפיפותו אחידה ושווה ל- ρ . משך ההקפה של הלוויין הוא T .
נתונים: T, ρ, R .



$$\rho T^2 = \frac{3\pi}{G}$$

א. הוכח ש:

$$g = \left(\frac{\pi}{T} \right)^2 \cdot R$$

ב. הוכח שתאוצת הכובד בעומק של $\frac{3}{4}R$ מתחת לפני הכוכב שווה ל-

ג. הוכח שבגובה R מעל לפני הכוכב יימדד אותו ערך של g שמצאת בסעיף ב'.

פתרון תרגיל 6

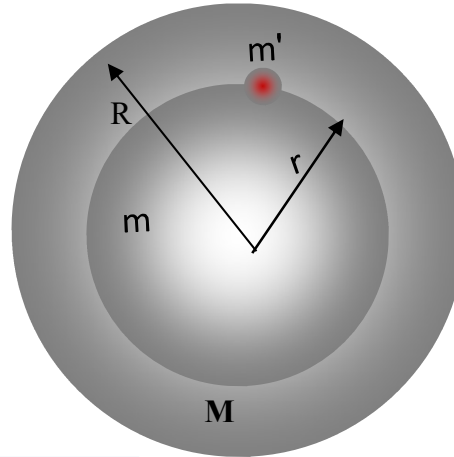
א.

$$\frac{G \cdot M \cdot m}{R^2} = \frac{m \left(\frac{2\pi R}{T} \right)^2}{R}$$

$$\rho = \frac{M}{V} = \frac{M}{\frac{4}{3}\pi R^3}$$

$$\rho \cdot \frac{4}{3}\pi R^3 = M$$

$$\frac{G \cdot \rho \cdot \frac{4}{3}\pi R^3 \cdot m}{R^2} = \frac{m \left(\frac{4\pi^2 R^2}{T^2} \right)}{R} \Rightarrow \boxed{\rho T^2 = \frac{3\pi}{G}}$$



$$\frac{G \cdot M}{R^2} = \frac{4\pi^2}{T^2} R$$

$$GM = \frac{4\pi^2}{T^2} R^3$$

$$g^* = \frac{GM}{R^3} \cdot r$$

$$\boxed{g^* = \frac{\frac{4\pi^2}{T^2} R^3}{R^3} \cdot \frac{1}{4} R = \left(\frac{\pi}{T} \right)^2 \cdot R}$$

$$\boxed{g^* = \frac{GM}{r^2} = \frac{\frac{4\pi^2}{T^2} R^3}{(2R)^2} = \left(\frac{\pi}{T} \right)^2 \cdot R}$$

$$\rho = \frac{m}{V'} = \frac{m}{\frac{4}{3}\pi r^3}$$

$$\rho = \frac{M}{V} = \frac{M}{\frac{4}{3}\pi R^3}$$

$$\frac{M}{\frac{4}{3}\pi R^3} = \frac{m}{\frac{4}{3}\pi r^3} \Rightarrow$$

$$m = \frac{r^3}{R^3} \cdot M$$

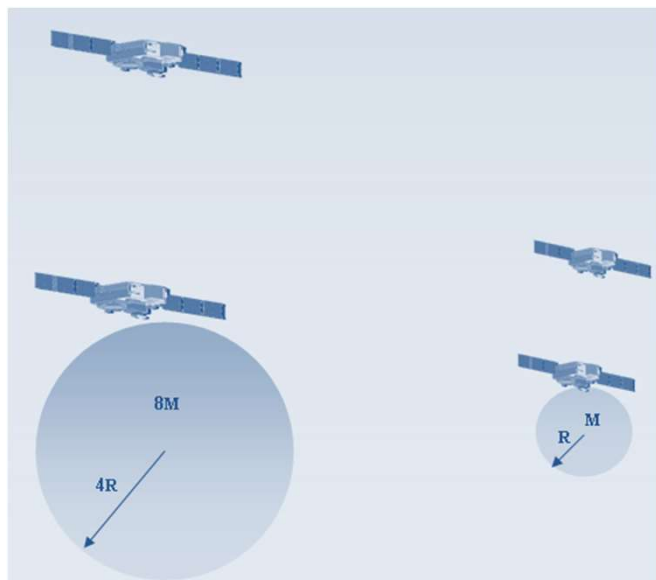
$$\frac{Gmm'}{r^2} = m'g^* \Rightarrow$$

$$g^* = \frac{GM}{R^3} \cdot r$$

ב.

ג.

רדיוסו של כוכב 1 הוא R ומסתו M . רדיוסו של כוכב 2 הוא $4R$ ומסתו $8M$.
נתונים: R, M, G .



א. מהו היחס (ρ_1/ρ_2) בין צפיפויות שני הכוכבים?
ב. מהו היחס בין תאוצות הכובד (g_1/g_2) על פני שני הכוכבים?

קרוב לפניו של כל אחד מהכוכבים סובב לוויין במסלול מעגלי.

ג. מהו היחס (V_1/V_2) בין מהירויות שני הלוויינים?

בגובה R מעל פני הכוכב הראשון סובב לוויין שמסתו m , ובגובה $4R$ מעל פני הכוכב השני סובב לוויין נוסף שמסתו m .

ד. 1) מהו היחס בין זמני המחזור (T_1/T_2) של שני הלוויינים?

2) האם ניתן לענות על סעיף ד1 לפי החוק השלישי של קפלר? נמק!

תחושת "חוסר משקל" במעבורות חלל

התמונות של אסטרונאוטים מרחפים במעבורות החלל שלהם, מפורסמות וידועות לכל. לעיתים מכנים מצב ריחוף זה כ"חוסר משקל". כזכור הגדרנו את משקלו של גוף כמכפלת מסתו m בתאוצת הכובד g הפועלת עליו. האם הם באמת חסרי משקל? התשובה, לא! אך התחושה שלהם הינה של "חוסר משקל" בדומה למה שחשים בנפילה חופשית.



"אין ספק שהחוויה הכי גדולה היא הריחוף. אנחנו ישנים בתוך ארון כזה, מרחפים בפנים. זה ממש כיף, אנחנו משתעשעים עם זה כל הזמן."



צוות הקולומביה
תצלום זה נתגלה בסרט ששרד את הנפילה ופותח רק אחרי התאונה.

תחושת "חוסר משקל" במעבורות חלל המשך

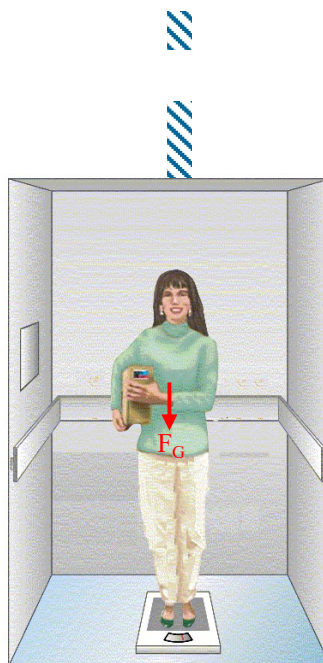
מעבורות חלל נמצאות בגבהים של מאות קילומטרים מכדור הארץ. בגובה 600 ק"מ ערכה של תאוצת הכובד הוא 8.4 m/s^2 . כלומר הכוח הפועל על האסטרונאוטים ועל הגופים ברכב החלל קרוב מאוד לכוח הפועל עליהם על פני כדור הארץ.

מדוע אם כן יש להם תחושה של העדר משקל? הסיבה היא: במהלך התנועה המעגלית, המעבורת וכל אשר בתוכה נופלים אנכית חופשית בתאוצה רדיאלית של 8.4 m/s^2 תוך כדי תנועה במהירות אופקית. במצב הזה אין למעשה מגע בין האסטרונאוטים לדפנות רכב החלל, כי הם נופלים באותה תאוצה, מצב היוצר תחושה של ריחוף או "חוסר משקל".



תחושת "חוסר משקל" במעבורות חלל המשך

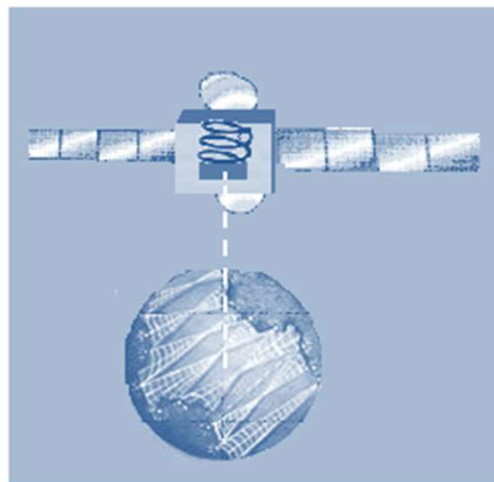
המצב דומה למה שקורה לנמצאים במעלית כאשר לפתע נקרע כבל המעלית. הנעים במעלית אינם חשים את רצפת המעלית כי היא נופלת יחד איתם באותה תאוצה ואין מגע איתה. הם מרחפים במעלית ללא מגע עם קרקעיתה, למרות שעדיין פועל עליהם כוח הכבידה שמפעיל כדור הארץ.



$$W = 0$$

http://www.youtube.com/watch?v=d57C2drB_wc&feature=player_detailpage

מודדים את משקלו של גוף הנמצא בתוך לוויין באמצעות מאזני קפיץ. כאשר הלוויין נמצא על הקרקע מראים המאזניים 20 N , ותוך כדי השילוח הוראת המאזניים הייתה 90 N .



- א. מה הייתה תאוצת הלוויין בעת השילוח?
- ב. מה מראים המאזניים כאשר הלוויין נע במסלול סביב כדור הארץ, לאחר שכבו מנועי השילוח? הסבר.

א.

$$\sum F_Y = 0$$

$$N - mg = 0$$

$$20 - m \cdot 10 = 0 \Rightarrow m = 2kg$$

$$\sum F_Y = ma$$

$$N - mg = ma$$

$$90 - 2 \cdot 10 = 2 \cdot a$$

$$a = 35 \frac{m}{sec^2}$$

ב. המאזניים מראים אפס.

במהלך התנועה המעגלית, הלוויין וכל אשר בתוכו נופלים אנכית חופשית בתאוצה רדיאלית תוך כדי תנועה במהירות אופקית. במצב הזה אין למעשה מגע בין המשטח לגוף, כי הם נופלים באותה תאוצה, מצב היוצר "חוסר משקל".

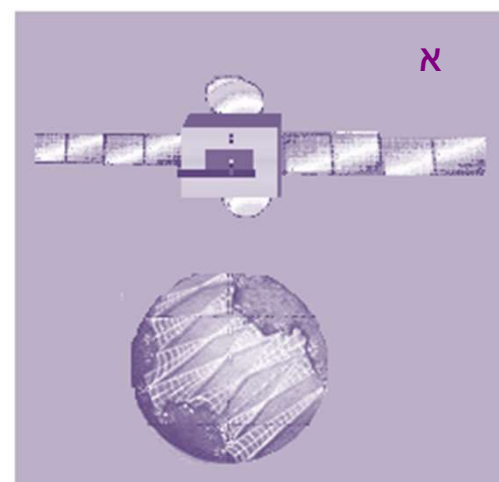
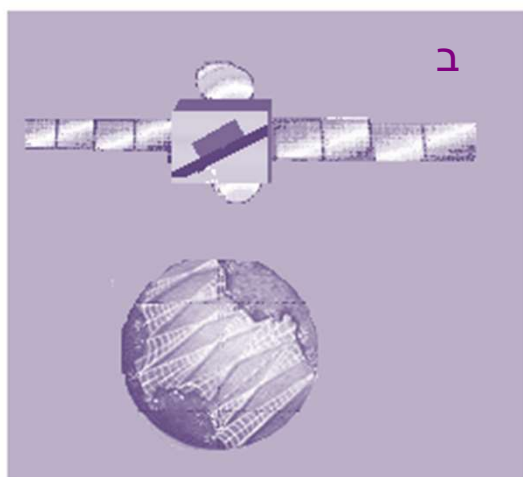
לוויין שמסתו $m=500 \text{ kg}$ מקיף את כדור הארץ במסלול מעגלי בזמן מחזור של $T=7200 \text{ sec}$.

א. מהו הרדיוס של מסלול הלוויין?

ב. מהי מהירותו של הלוויין?

בתוך הלוויין נמצא משטח מישורי חלק. אסטרונאוט מניח על המשטח גוף שמסתו $m=1 \text{ kg}$. (תרשים א)

ג. מהו הכוח שמפעיל עליו המשטח?



מטים את המשטח בזווית α ביחס לרדיוס המחבר את הלוויין למרכז כדור הארץ. (תרשים ב)

ד. האם הכוח שמפעיל עליו המשטח יגדל, יקטן או לא ישתנה? נמק.

א.

$$\frac{G \cdot M_E \cdot m}{r^2} = \frac{m \left(\frac{2\pi r}{T} \right)^2}{r} \Rightarrow r = \sqrt[3]{\frac{G \cdot M_E \cdot T^2}{4\pi^2}}$$

ב.

$$v = \frac{2 \cdot \pi \cdot r}{T}$$

ג+ד. אפס בשני המצבים.

במהלך התנועה המעגלית, הלוויין וכל אשר בתוכו נופלים אנכית חופשית בתאוצה רדיאלית תוך כדי תנועה במהירות אופקית. במצב הזה אין למעשה מגע בין המשטח לגוף, כי הם נופלים באותה תאוצה, מצב היוצר "חוסר משקל".

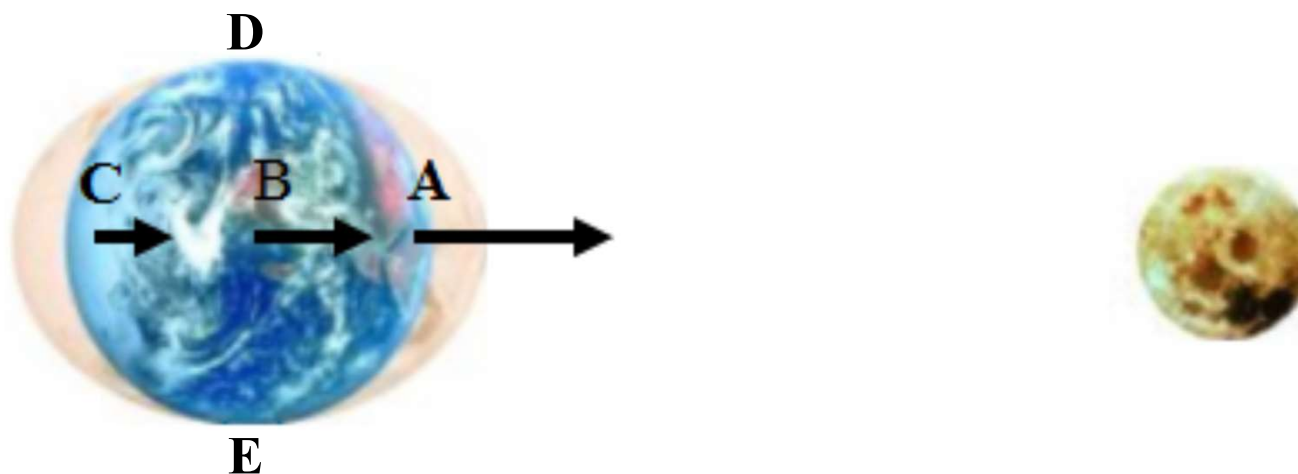
אחת התופעות המרשימות על פני כדור הארץ הינה תופעת הגאות והשפל של מי ימים ואוקיינוסים. זוהי תופעה מחזורית בה גובה פני המים בימים ובאוקיינוסים עולים או יורדים במחזוריות של בערך 6 שעות בין גאות לשפל או בערך 12 שעות בין גאות לגאות. בחופים מסוימים של אוקיינוסים, ההפרש בין גאות לשפל יכול להגיע אפילו ל 10 מטרים.

בצילום גאות ושפל במפרץ פאנדי, נובה סקוטיה, קנדה. (לקוח מויקיפדיה)



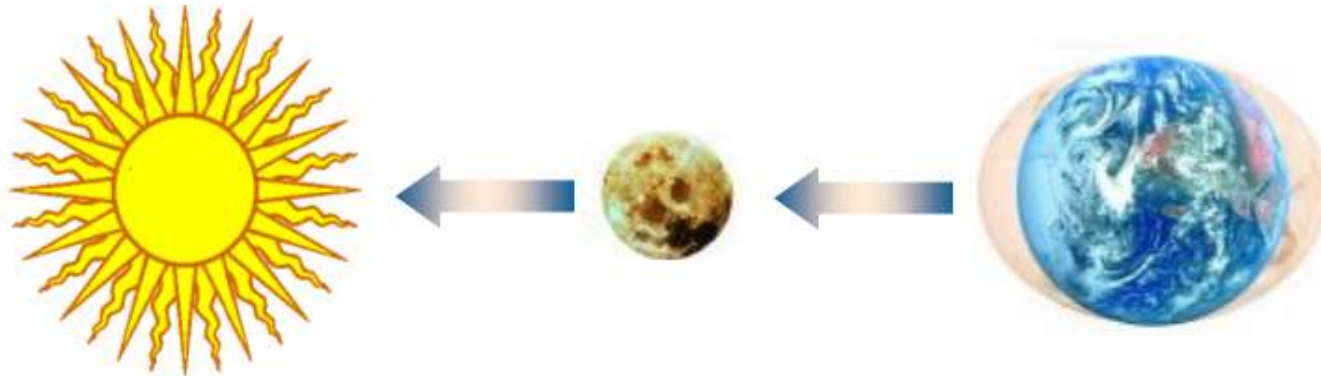
הרחבה – תופעת גאות ושפל

תופעת גאות והשפל של מי הימים ידועה אלפי שנים. אולם הראשון שנתן לה הסבר מדעי היה ניוטון באמצעות חוק הכבידה העולמי, ובכך יש ניצחון לגילוי של חוק הכבידה העולמי. ההסבר מתבסס על הפרש כוחות הכבידה הפועלים בנקודות שונות ולא רק על הכוחות עצמם. הפרש כוחות זה ידוע בשם כוח גאות. לא ניכנס להסבר מלא לתופעת הגאות ונסתפק בכך שנציין שאזורי כדור הארץ, הקרובים יותר לירח (אזור A), נמשכים חזק יותר מהאזורים שבמרכז כדור הארץ (אזור B), ובאזור C פועל כוח חלש יותר מאשר באזורים A ו-B. הפרשים אלו של הכוחות גורמים לכך שכדור הארץ מתעוות במקצת בעיקר באזורי הימים וכתוצאה מכך גאות במקומות A ו-C ולכן שפל במקומות D ו-E.



השפעת השמש על הגאות והשפל

גם לשמש השפעה על תופעות הגאות והשפל, אך היא קטנה יותר בגלל מרחקה מכדור הארץ. השמש גורמת להגברה ולהחלשה של הגאות והשפל, הנגרמים על ידי הירח. כאשר הירח, השמש וכדור הארץ נמצאים על אותו קו פעולה (זה קורה בכל תחילת חודש עברי וגם במחציתו – ירח מלא), מחזקות שתי תופעות העיוות זו את זו וגורמות לכך, שהגאות והשפל גדולים במיוחד.



<http://astro.unl.edu/classaction/animations/lunarcycles/tidesim.html>

<http://dusk.geo.orst.edu/oceans/PPT/TidalCycleV2.html>

- ❖ בין כל שתי מסות נקודתיות פועל, לאורך הישר המחבר ביניהם, כוח משיכה הדדי שהינו ביחס ישר למסות החלקיקים וביחס הפוך לריבוע המרחק ביניהם.

$$F_g = G \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}$$

הניסוח המתמטי של חוק הכבידה העולמי:

- ❖ תאוצת הכובד ממרכז הכוכב ועד לפני הכוכב תאוצת הכובד גדלה, ונמצאת ביחס ישר למרחק ממרכז הכוכב.

$$g^* = \frac{GM}{R^3} \cdot r$$

- ❖ במרחקים הגדולים מרדיוס הכוכב תאוצת הכובד קטנה, ונמצאת ביחס הפוך לריבוע המרחק ממרכז הכוכב.

$$g^* = \frac{GM}{r^2}$$

- ❖ בתנועת לוויין רק כוח המשיכה של הארץ משמש ככוח צנטריפטאלי המאלץ את הלוויין לנוע במסלול מעגלי. עבור כל מרחק בין מרכזי המסות ישנה **מהירות אחת ויחידה**, שאיתה תמשיך המסה m לנוע במסלול מעגלי סביב M . כיוונה **משיק** למסלול.

$$v = \sqrt{\frac{GM}{r}}$$

- ❖ תחושה של ריחוף או "חוסר משקל" במעבורת נובעת מכך שהמעבורת וכל אשר בתוכה נופלים אנכית חופשית בתאוצה רדיאלית תוך כדי תנועה במהירות אופקית. במצב הזה אין למעשה מגע בין האסטרונאוטים לדפנות רכב החלל, כי הם נופלים באותה תאוצה.