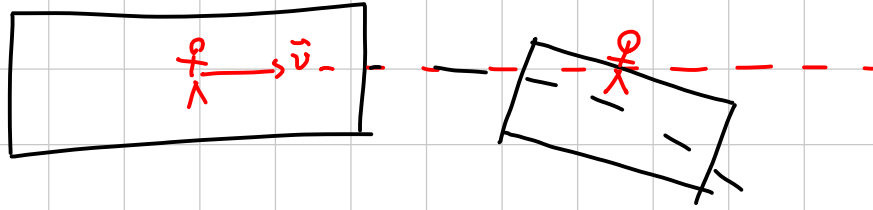


כשאנ' נמצא באוילומוס והוא פונה בעיקר, אנו נצבק עקיר. מה זה הכוח הזה שצוחף אנוי אחוזה?



אין כוח שצוחף אנוי החיזה, אנו בשטח משיק ערסוס בקו ישר, ערז שהצופן של האוילומוס צוחפת אנוי ומאצנת אנוי עהסמבה יחד עם האוילומוס. הכוח הצנטריפטי שפועל ערז הוא הטרמם מצופן האוילומוס, ואנו מכילס אנוי בהכרח!

ומה טועם לאסטרונאוט בתחנת החלל? גם הוא מסתובב סביב כדור הארץ, אכילס הוא לא נצבק מצופן החללית, ערפן, הוא מרייל שהוא מרחיל! עמה כדורס יצום כל כך בין שתי הצומאנו?

המקרה של האוילומוס, הטרמם בועץ ערז חלק מכלול שני, זה טועם בצופן האוילומוס. חלק מנוי מרייל כוח, וחלק מנוי לא מרייל, והכרס הזה ניתן ערמילס באול. ערצומת שאר, כוח הכביזה שפועל ערז האסטרונאוט בועץ ערז כם החלקיקים שלו באופן שווה, אז חלק מרייל לא ירייל משקו אתר מתק אתר באול. נעמז עכילו יותר ערז הכוח הזה.

# כרטיסיה

גודל הכוח

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

חוק הכבידה  
העולמי

LAW OF UNIVERSAL  
GRAVITATION



$$G = 6.67 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$$

משפט הקסימה: קסימה כדורית גדול משה מושך חלקיק  
מחוץ לקסימה כאילו כם המסה שלה מרוכזת  
במרכזה

## תביא

תפוח משוחרר מגובה 2m מעל הקרקע, או ממרחק 6371 km ממרכז כדור הארץ. מה תהיה  
תאוצת התפוח לפי חוק הכבידה העולמי?

$\oplus$  סימן לכדור הארץ



$$F = ma$$

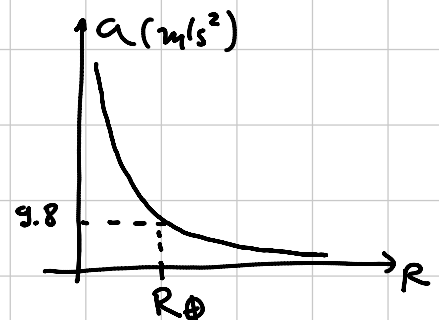
$$M_{\oplus} = 5.972 \cdot 10^{24} \text{ kg}$$

$$F = \frac{m M_{\oplus} G}{r^2}$$

$$R_{\oplus} = 6371 \text{ km}$$

$$ma = \frac{m M_{\oplus} G}{R^2} \rightarrow a = \frac{M_{\oplus} G}{R^2}$$

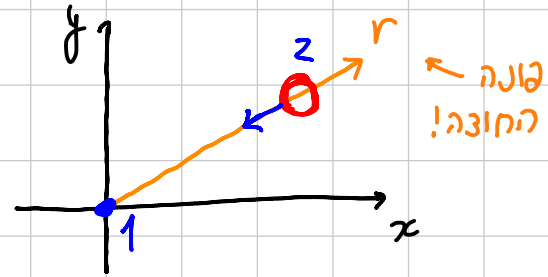
$$a = \frac{5.972 \cdot 10^{24} \cdot 6.67 \cdot 10^{-11}}{(6.371 \cdot 10^6)^2} = \frac{5.972 \cdot 6.67 \cdot 10^{24-11-6 \cdot 2}}{(6.371)^2} = 9.8 \text{ m/s}^2$$



# אנרגיה פוטנציאלית גרביטציונלית

$$\vec{F} = - \frac{m_1 m_2 G}{r^2} \hat{r}$$

הכיוון הקו  
בין מרכז המסה  
של 1-2



$$\vec{F} = - \frac{dU}{dr} \hat{r}$$

איזה  $U(r)$  מתאים?

נקיים את  
הצורה  
הנכונה

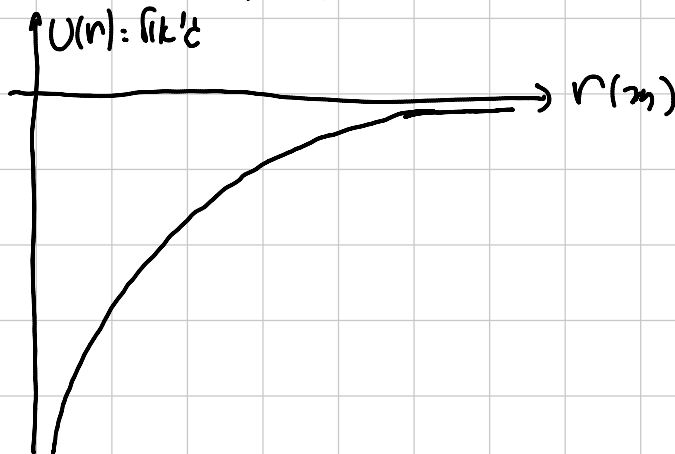
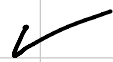
$$U(r) = - \frac{m_1 m_2 G}{r}$$

לדבוק כי

$$\vec{F} = - \frac{dU}{dr} \hat{r} = - \frac{d}{dr} \left( - \frac{m_1 m_2 G}{r} \right) \hat{r} = m_1 m_2 G \frac{d}{dr} \left( \frac{1}{r} \right) \hat{r}$$

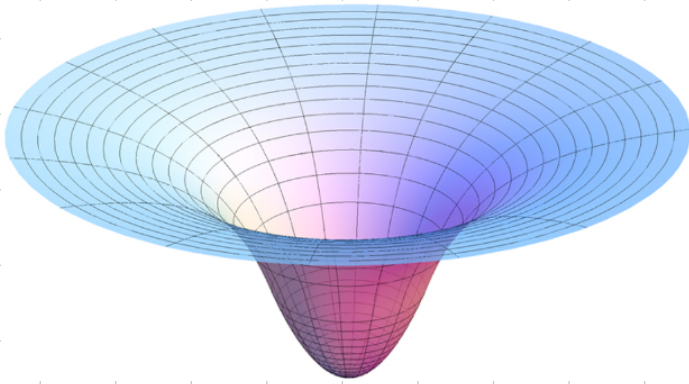
$$\frac{d}{dr} \left( \frac{1}{r} \right) = \frac{d}{dr} (r^{-1}) = -1 \cdot r^{-2} = - \frac{1}{r^2}$$

$$\vec{F} = m_1 m_2 G \left( - \frac{1}{r^2} \right) \hat{r} = - \frac{m_1 m_2 G}{r^2} \hat{r}$$

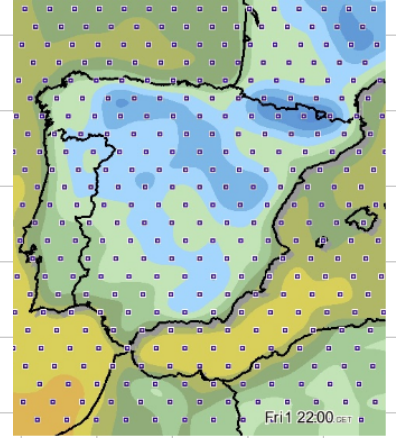


# שדה סקלרי ושלדה וקטורי

שדה סקלרי: כמות שיש לה ערך סקלרי בכל נקודה במרחב.  
 דוגמאות: טמפרטורה, לחץ אוויר, אנרגיה פוטנציאלית גרביטציונלית

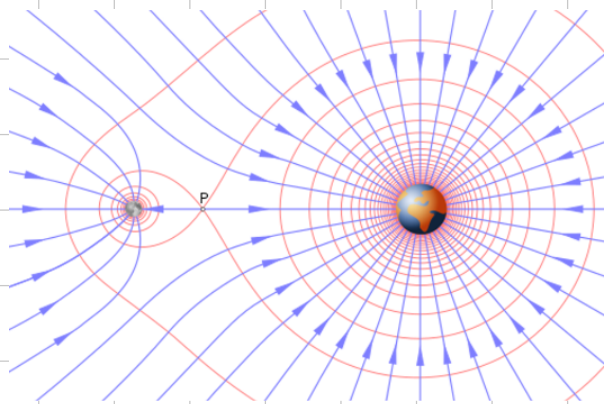


אנרגיה פוטנציאלית

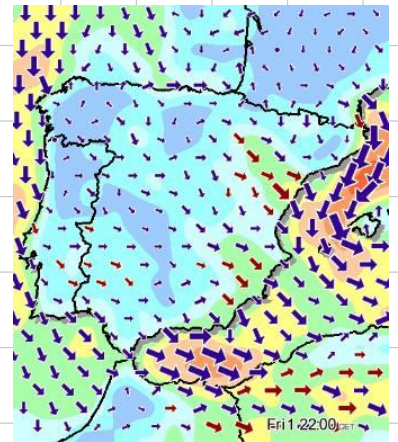


מפת טמפרטורה

שדה וקטורי: כמות שיש לה ערך וקטורי בכל נקודה במרחב.  
 דוגמאות: מהירות רוח, כוח גרביטציונלי



כוח גרביטציונלי

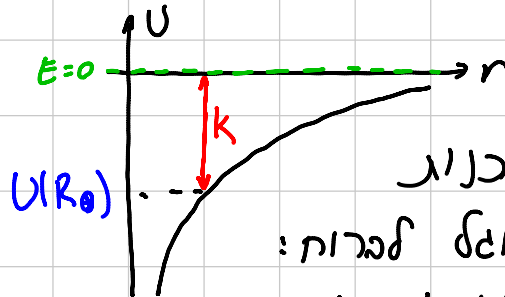


מפת רוח

כמה אנרגיה קינטית יש להקנות לגוף בעל מסה  $m$  שנמצא על פני כדור הארץ כדי שהוא יברח ולא יחזור לעולם? מה המהירות שיש לתת לו?

$$M_{\oplus} = 5.972 \cdot 10^{24} \text{ kg}$$

$$R_{\oplus} = 6371 \text{ km}$$



עץ אנרגיה מכניו  
 $E=0$  היא מוסלם לפרוח:

$$E = K + U$$

$$E=0 = K + U(R)$$

$$K - \frac{mMG}{R} = 0 \rightarrow \boxed{K = \frac{mMG}{R}}$$

$$K = \frac{mv^2}{2} = \frac{mMG}{R} \rightarrow$$

$$\boxed{v = \sqrt{\frac{2MG}{R}}}$$

מהירות מילוס

עם פני כדור הארץ מהירות המילוס היא  $11 \text{ km/s}$  !

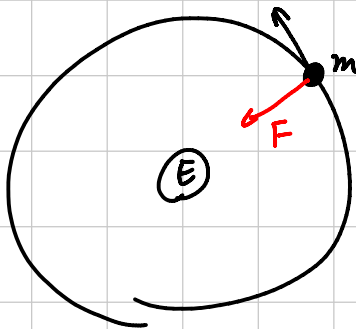
אורביטה

תרש"ל

התחנה הבינלאומית מקיפה את כדור הארץ כל 93 דקות.

א. מה גודל מהירותה?

ב. באיזה גובה מעל פני הקרקע היא מסתובבת?



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

$$\frac{m M G}{r^2} = \frac{m v^2}{r}$$
$$v^2 = \frac{M G}{r}$$

$$M_{\oplus} = 5.972 \cdot 10^{24} \text{ kg}$$

$$R_{\oplus} = 6371 \text{ km}$$

$$G = 6.67 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$$

$$T = 93 \text{ min} = 5580 \text{ s}$$

$$v = \omega R \quad \left. \begin{array}{l} v = \frac{2\pi R}{T} \\ \omega = \frac{2\pi}{T} \end{array} \right\} \rightarrow R = \frac{v T}{2\pi}$$

$$v^2 \cdot R = M G$$

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

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

$$v = \sqrt[3]{\frac{2\pi M G}{T}} = 7655 \text{ m/s}$$

$$R = \frac{v T}{2\pi} = \frac{T}{2\pi} \sqrt[3]{\frac{2\pi M G}{T}} = 6798 \text{ km}$$

$$R - R_{\oplus} = 6798 - 6371 = 427 \text{ km}$$

# תרגיל

מסלול גאוסטציונרי הוא מסלול שזמן המחזור שלו הוא 24 שעות. באיזה מרחק ממרכז כדור הארץ לוויין צריך לחוג כדי להיות במסלול גאוסטציונרי?

$$\omega_{SAT} = \omega_{EARTH}$$
$$T_{SAT} = T_{EARTH}$$

מסלול גאוסטציונרי:

$$\frac{mMG}{R^2} = \frac{mv^2}{R}$$

$$\left. \begin{aligned} v &= \omega R \\ \omega &= \frac{2\pi}{T} \end{aligned} \right\} v = \frac{2\pi R}{T}$$

$$v^2 = \frac{MG}{R} \rightarrow (2\pi)^2 \frac{R^2}{T^2} = \frac{MG}{R}$$

$$R^3 = \frac{MG}{(2\pi)^2} T^2$$

החוק השלישי של קפלר!



$R = 42\,231 \text{ km}$  :  $T = 24 \text{ h}$  - |  $M = M_{\oplus}$       צבוק  
 $R - R_{\oplus} = 35\,860 \text{ km}$                               מסלול בני הקרקע :

# תרגיל

בעזרת "מעלית חלל" אנו רוצים להעלות חבילה של 200 kg לגובה 100 km מעל פני הקרקע. כמה אנרגיה יש להקנות לחבילה? כמה אנרגיה יש לתת לכל קילוגרם?

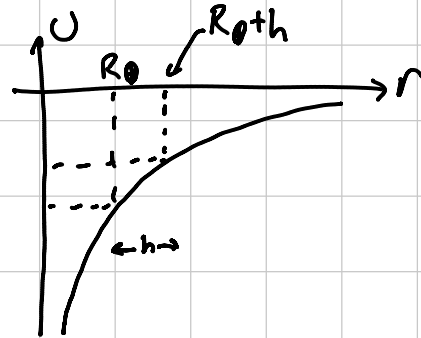


$$M_{\oplus} = 5.972 \cdot 10^{24} \text{ kg}$$

$$R_{\oplus} = 6371 \text{ km}$$

$$G = 6.67 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$$

$$h = 100 \text{ km}$$



$$E_0 = U(R_{\oplus} + h) - U(R_{\oplus}) = -\frac{m M_{\oplus} G}{R_{\oplus} + h} - \left( -\frac{m M_{\oplus} G}{R_{\oplus}} \right)$$

$$E_0 = m M_{\oplus} G \left( \frac{1}{R_{\oplus}} - \frac{1}{R_{\oplus} + h} \right) = 1.9 \cdot 10^8 \text{ J}$$

מה "המחיר" האנרגטי עק"ם? יש אולי את המושג הזה?  
הינ"ם כ-200 kg: m

$$\frac{E_0}{m} = 9.7 \cdot 10^5 \frac{\text{J}}{\text{kg}}$$

פוטנציאל כרטיסיוני : הגדרה:

$$V = \frac{U}{m} \text{ (J/kg)}$$

$$V = \frac{M G}{r}$$

$$\vec{F} = -\frac{dU}{dr} \hat{r}$$

$$\vec{g} = -\frac{dV}{dr} \hat{r}$$

$$\vec{F} = m \vec{g}$$

$$U = m V$$



## שאלה 2 [30 נקודות]

לוויין בעל מסה  $m = 150 \text{ kg}$  משוגר לאורביטה גאוסטציונרית בשלושה שלבים. בשלב ראשון, הלוויין משוגר מפני כדור הארץ ל"מסלול לווייני נמוך" (Low Earth Orbit, LEO), שהוא מסלול מעגלי בעל רדיוס  $R_{LEO} = 8.0 \times 10^6 \text{ m}$ , ראו תמונה למטה. בשלב שני, בנקודה A, הלוויין מקבל תוספת מהירות של  $\Delta v_1$  על-ידי הטיל שנושא אותו, ועובר למסלול אליפטי, הנקרא "מסלול הוהמן" (Hohmann Transfer Orbit, HTO). לבסוף, כאשר הלוויין נמצא בנקודה B, הוא מקבל תוספת מהירות נוספת  $\Delta v_2$ , ועובר למסלול הגאוסטציונרי הרצוי, GEO.

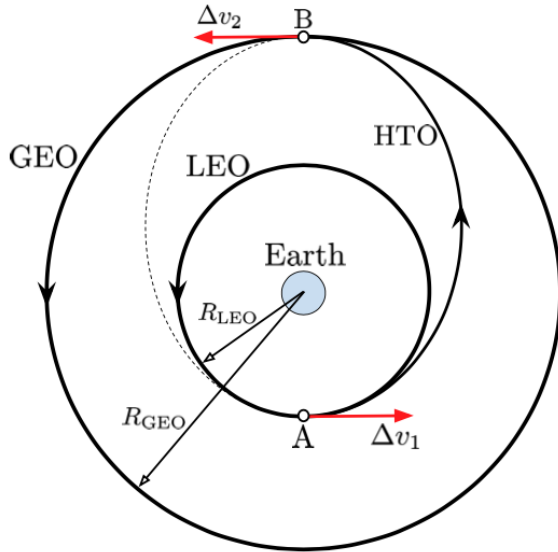
נתונים: מסלול גאוסטציונרי הוא מסלול בעל זמן מחזור של 24 שעות. מסת כדור הארץ היא  $M_{\oplus} = 5.972 \times 10^{24} \text{ kg}$ . הקבוע הגרביטציוני שווה  $G = 6.67408 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$ .

א. [10 נקודות] פתחו ביטוי פרמטרי עבור האנרגיה המכנית של הלוויין כאשר הוא נמצא במסלול לווייני נמוך, LEO. הביטוי צריך להיות תלוי ב:  $m, M_{\oplus}, G, R_{LEO}$ .

ב. [10 נקודות] מהו הרדיוס של המסלול הגאוסטציונרי  $R_{GEO}$ ? נמקו. [תשובה בקילומטרים]

ג. [5 נקודות] כמה עבודה (בג'אולים) הטיל עשה על הלוויין בין המסלול LEO למסלול GEO?

ד. [5 נקודות] באיזה מסלול, LEO או GEO, יש ללוויין גודל מהירות  $v$  גדול יותר? נמקו.



וגרסיה

א' 381N

2019-2020

<b>kinetic energy</b>	<b>momentum</b>
is a scalar.	is a vector.
is not changed by a force perpendicular to the motion, which changes only the direction of the velocity vector.	is changed by any force, since a change in either the magnitude or the direction of the velocity vector will result in a change in the momentum vector.
is always positive, and cannot cancel out.	cancels with momentum in the opposite direction.
can be traded for other forms of energy that do not involve motion. KE is not a conserved quantity by itself.	is always conserved in a closed system.
is quadrupled if the velocity is doubled.	is doubled if the velocity is doubled.