

הוראות לדף הנוסחאות



הוראות הדפסה!

את הדף יש להדפיס עם שוליים מותאמים אישית ברוחב 0.5 בכל צד.

ב WORD, יש לבחור בלשונית הדפסה את חלון השוליים, לבחור שוליים מותאמים אישית ולשנות ל 0.5 בכל הכיוונים

עריכה:

בדף הכנסנו כמה שיותר הסברים, נוסחאות ותמונות. אם מספר העמודים חורג ממספר העמודים המותר בבחינה ניתן לערוך את קובץ ה WORD ולהוריד הסברים מורחבים, תמונות או נוסחאות טריוויאליות. ניתן גם כמובן להוסיף הסברים שלכם או נוסחאות.

בכל מקרה מומלץ מאוד לעבור על הדף לפני המבחן!! הוא גם סיכום של החומר.

אין להוריד את הסמל של GOOL או כל סימן מסחרי אחר!!

מבנה הדף:



הדף בנוי משלושה טורים.

ההתחלה היא בפינה הימנית העליונה.

בסוף הטור הראשון עוברים לטור השני באותו עמוד (ולא לעמוד הבא). בסוף הטור האחרון עוברים לטור הראשון (הימני) בעמוד הבא.

ניתן לשנות את כיוון הפריסה לרוחב, זה יוצר מראה יותר מרווח על חשבון מספר עמודים.

כל הזכויות שמורות למני גבאי ולאתר GOOL

הדף מיועד לכל שימוש שאינו מסחרי ובפרט לשימוש מרצים, מורים, סטודנטים ותלמידים בקורסים שונים, ניתן לערוך את הדף אך יש להשאיר סימונים של אתר גול.

הנמדד ו- $\vec{a}_0$ היא תאוצת הצופה.

ניתן להסתכל על מערכת גופים כגוף נקודתי שמסתו היא סכום המסות ומהירותו היא מהירות מרכז המסה. מערכת מרכז המסה היא מערכת שזוהי ביחד עם נקודת מרכז המסה. בשביל למצוא את מהירות הגופים במערכת מרכז המסה נשתמש בטרנספורמציות גליליי. במערכת מרכז המסה התנע הכולל של המערכת הוא אפס ולכן, במקרה של שני גופים, הגופים תמיד ינועו על ציר אחד. אם ההתנגשות אלסטית, גודל המהירות של כל גוף נשמר.

GOOL בעיית שני הגופים- מסות מצומדות

נוסחאות המעבר למשתנים:

$$\vec{r}_{c.m.} = \frac{m_1 \vec{r}_1 + m_2 \vec{r}_2}{m_1 + m_2}; \quad \vec{r}_{rel} = \vec{r}_2 - \vec{r}_1$$

$$\vec{r}_1 = \vec{r}_{c.m.} - \frac{m_2 \vec{r}_{rel}}{m_1 + m_2}; \quad \vec{r}_2 = \vec{r}_{c.m.} + \frac{m_1 \vec{r}_{rel}}{m_1 + m_2}$$

האנרגיה: $E = \frac{1}{2}(m_1 + m_2)v_{c.m.}^2 + \frac{1}{2}\mu v_{rel}^2 + U(r_{rel})$

כאשר $\mu = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}$ היא המסה המצומצמת

תנ"י:

GOOL מומנט התמד

$$\vec{L} = \vec{r}_{c.m.} \times \vec{p}_{c.m.} + \vec{L}_{c.m.}; \quad \vec{L}_{c.m.} = \mu \vec{r}_{rel} \times \vec{v}_{rel}$$

אם גוף קשיח מסתובב סביב ציר סיבוב כל הנקודות על הגוף מבצעות תנועה מעגלית באותה המהירות הזוויתית (אך לא באותה מהירות קווית)

מומנט התמד של מערכת גופים נקודתיים: $I = \sum m_i r_i^2$

משפט שטיינר: $I' = I_{c.m.} + md^2$

כאשר d הוא המרחק בין הצירים ו m היא המסה הכוללת של הגוף. הערה: משפט שטיינר פועל רק לצירים מקבילים, ורק כאשר אחד הצירים עובר במרכז המסה. אדטיביות: ניתן לסכום את המומנט התמד של כל חלק וחלק בגוף על מנת לקבל את המומנט הכולל. $I_T = I_1 + I_2$

גוף נקודתי סביב ציר כלשהו:	$I = mR^2$
טבעת וגליל חלול סביב הציר המרכזי:	$I_{c.m.} = mR^2$
דיסקה/גליל מלא במרכז מסה סביב ציר z-אנך לדיסקה	$I_{c.m.} = \frac{1}{2}mR^2$
דיסקה במרכז מסה סביב ציר x-במישור הדיסקה	$I_{c.m.} = \frac{1}{4}mR^2$
מוט במרכז המסה	$I_{c.m.} = \frac{1}{12}mL^2$
מוט בקצה	$I = \frac{1}{3}mL^2$
כדור מלא במרכז מסה	$I_{c.m.} = \frac{2}{5}mR^2$
תיבה או לוח במרכז מסה	$I_{c.m.} = \frac{m(a^2 + b^2)}{12}$

נוסחה המקשרת בין צירים שונים: $I_z = I_x + I_y$

אם $I_x = I_y$ (בדרי"כ מסימטריה) אז $I_z = 2I_x$

מבנה הגוף סימטרי לאורך ציר z: מומנט ההתמד של הגוף סביב ציר z יהיה כמו של גוף משטחי במישור xy. לדוגמה מומנט ההתמד של גליל יהיה כמו של דיסקה ומומנט ההתמד של קוביה יהיה כמו של מלבן שהוא בסיס הקוביה.

חישוב עם אינטגרל: עבור גוף קשיח: $I = \int r^2 dm$

כאשר r הוא המרחק של כל גוף מציר הסיבוב (ולא מהראשית). אם ציר הסיבוב הוא ציר $z: x^2 + y^2 = r^2$

GOOL מומנט כוח:

מומנט כוח: $\vec{\tau} = \vec{r} \times \vec{F}$

כאשר $\vec{r}$ הוא וקטור שיוצא מהציר עד לנקודה שבה פועל הכוח (ניתן לחשב את המכפלה באמצעות דטרמיננטה או באמצעות גודל וכיוון)

גודל המומנט: $|\vec{\tau}| = |\vec{r}||\vec{F}| \sin \alpha = |\vec{F}|r_{\perp}$

כאשר $r_{\perp}$ הוא הרכיב של $\vec{r}$ המאונך לכוח כיוון לפי כלל יד ימין או כלל הבורג.

GOOL תנע זוויתי (תנ"ז)

תנ"ז: $\vec{L} = \vec{r} \times \vec{p}$

$\vec{r}$ - הוא וקטור המיקום של הגוף, $\vec{p}$ - התנע הקווי עבור גוף הנע בקו ישר ניתן לחשב את התנ"ז לפי:

כאשר d זה המרחק האפקטיבי. v - המהירות. הקשר בין תנ"ז

למומנט כוח: $\sum \vec{\tau} = \frac{d\vec{L}}{dt}$

חוק שימור התנע הזוויתי: אם $\sum \vec{\tau}_{ext} = 0$ אז התנע הזוויתי נשמר

תנ"ז של תנועה משולבת, מערכת גופים שמסתובבים סביב מרכז מסה שני: $\vec{L} = \vec{r}_{c.m.} \times \vec{p}_{c.m.} + \vec{L}_{c.m.}$

כאשר $\vec{r}_{c.m.} \times \vec{p}_{c.m.}$ זה התנע הזוויתי של מרכז המסה כאילו הוא גוף נקודתי שהמסה שלו היא מסת כל המערכת ו $\vec{L}_{c.m.}$ התנע הזוויתי ביחס למערכת מרכז המסה, כלומר סך התנ"ז של הגופים במערכת ביחס לצופה הנע בנקודת מרכז המסה.

GOOL בדידה וכוח מרכזי

כוח מרכזי: $\vec{F}(r) = f(r)\hat{r}$

- תלוי רק ב r ובכיוון רדיאלי בלבד.

כוח מסה (אנרגיה): לא מפעיל מומנט כוח ולכן הוא משמר גם תנע זוויתי.

כוח הכובד: $\vec{F} = -\frac{GMm}{r^2}\hat{r}$

כאשר $G = 6.67384 \cdot 10^{-11} m^{-3} kg^{-1} s^{-2}$

- קרוב לכד"א $\frac{GM_E}{r^2} \approx mg$

כאשר $r \approx R_E \approx 6400 km$; $M_E \approx 5.97 \cdot 10^{24} kg$

ו- $g = \frac{GM_E}{R_E^2}$

האנרגיה הפוטנציאלית של כוח הכובד: $U(r) = -\frac{GMm}{r}$

הצורה הזו של האנרגיה היא צורה כללית שיש לכוחות נוספים והרבה פעמים רושמים אותה כ: $U(r) = -\frac{\alpha}{r}$

כאשר $\alpha = GMm$ עבור הכובד. עבור הכובד $\alpha = GMm$

המסלול של גוף תחת כוח הכובד: $r(\theta) = \frac{r_0}{1 + \epsilon \cos \theta}$

כאשר $r_0 = \frac{L^2}{ma}$; $\epsilon = \sqrt{1 + \frac{2EL^2}{ma^2}}$

הכוללת של הגוף ו L הוא התנ"ז. צורת המסלול מתחלקת ל-3 מקרים:

מקרה 1: מעגל $\epsilon = 0$. במקרה הזה ניתן להשוות את הכוח ל- $\frac{mv^2}{r}$ ולקבל ש: $v = \sqrt{\frac{GM}{r}}$

מקרה 2: אליפסה $0 < \epsilon < 1$. מקור הכוח נמצא באחד ממוקדי האליפסה.

האנרגיה הפוטנציאלית של כוח הכובד: $U(r) = -\frac{GMm}{r}$

הצורה הזו של האנרגיה היא צורה כללית שיש לכוחות נוספים והרבה פעמים רושמים אותה כ: $U(r) = -\frac{\alpha}{r}$

כאשר $\alpha = GMm$ עבור הכובד. עבור הכובד $\alpha = GMm$

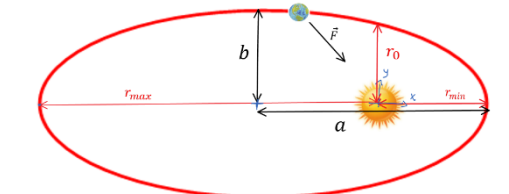
המסלול של גוף תחת כוח הכובד: $r(\theta) = \frac{r_0}{1 + \epsilon \cos \theta}$

כאשר $r_0 = \frac{L^2}{ma}$; $\epsilon = \sqrt{1 + \frac{2EL^2}{ma^2}}$

הכוללת של הגוף ו L הוא התנ"ז. צורת המסלול מתחלקת ל-3 מקרים:

מקרה 1: מעגל $\epsilon = 0$. במקרה הזה ניתן להשוות את הכוח ל- $\frac{mv^2}{r}$ ולקבל ש: $v = \sqrt{\frac{GM}{r}}$

מקרה 2: אליפסה $0 < \epsilon < 1$. מקור הכוח נמצא באחד ממוקדי האליפסה.



בד"כ נמצא המהירויות באמצעות שימור אנרגיה ותנ"ז.

$$v(r_{min}) = v_{max}; \quad v(r_{max}) = v_{min}$$

$$r_{min} = \frac{r_0}{1 + \epsilon}; \quad r_{max} = \frac{r_0}{1 - \epsilon}; \quad \epsilon = \frac{r_{max} - r_{min}}{r_{max} + r_{min}}$$

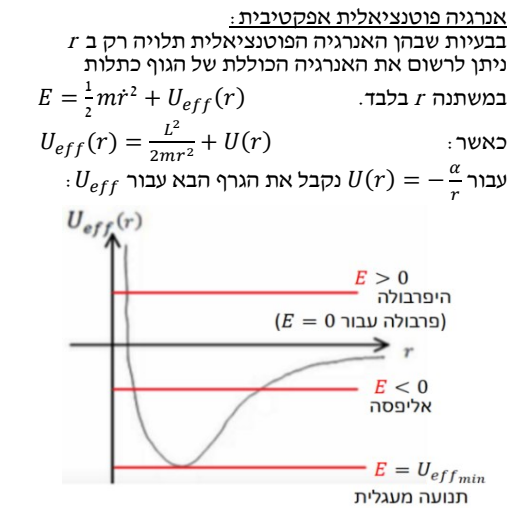
$$a = \frac{r_{min} + r_{max}}{2} = \frac{r_0}{1 - \epsilon^2} = -\frac{\alpha}{2E}; \quad b = \frac{r_0}{\sqrt{1 - \epsilon^2}}$$

- שטח האליפסה: $S = \pi ab$

מקרה 3: היפרבולה כאשר $\epsilon \geq 1$

$v(r_{min}) = v_{max}$ מהירות מילוט - המהירות הדרושה להגיע לאינסוף.

$$v_{escape} = \sqrt{\frac{2GM}{r}}$$

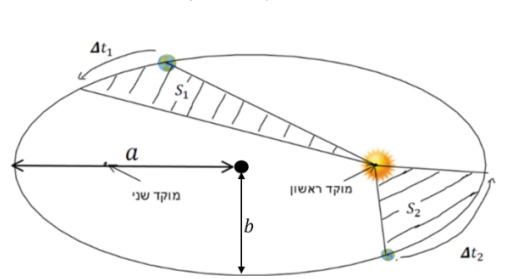


חוק 1 של קפלר: צורת המסלול של כל כוכב לכת סביב השמש היא אליפסה, שהשמש נמצאת באחד ממוקדיה.

חוק 2 - חוק השטחים השווים: הקו שמחבר את כוכב הלכת עם השמש (רדיוס המקום) מכסה שטחים שווים במרחקים שווים. מעבר לכך ניתן להגיד שגם אם הזמנים לא שווים היחס של השטח חלקי הזמן קבוע.

$$\frac{S_1}{\Delta t_1} = \frac{S_2}{\Delta t_2} = \frac{S_T}{T}$$

$S_T = \pi ab$ - שטח כל האליפסה, a/b - מחצית הציר הראשי/משני של האליפסה, T - זמן המחזור



חוק 3 של קפלר: $\left(\frac{T}{2\pi}\right)^2 = \frac{a^3}{GM}$

M - מסת הכוכב שבמוקד

במקרה של מערכת בינארית שבה שני הכוכבים זזים בנוסחה היא:

$$\left(\frac{T}{2\pi}\right)^2 = \frac{a^3}{G(m_1 + m_2)}$$

GOOL וקטורים

פירוק לרכיבים: $A_x = |\vec{A}| \cos \theta$

$A_y = |\vec{A}| \sin \theta$

$|\vec{A}| = \sqrt{A_x^2 + A_y^2}$

$\tan \theta = \frac{A_y}{A_x}$

כפל בסקלר:

$\alpha \vec{A} = (\alpha A_x, \alpha A_y)$

גוף קשיח

GOOL

אם גוף קשיח מסתובב סביב ציר סיבוב כל נקודות על הגוף מבצעות תנועה מעגלית באותה המהירות הזוויתית (אך לא באותה מהירות קווית)

תנע קווי של גוף קשיח: $\vec{p} = M\vec{v}_{c.m.}$

תנ"ז: גוף הנע בקו ישר (ללא סיבוב פנימי, כלומר לכל החלקים בגוף אותה מהירות קווית): $\vec{L} = \vec{r}_{c.m.} \times \vec{p}_{c.m.}$

- תנ"ז גוף קשיח המסתובב סביב ציר קבוע: $\vec{L} = I\vec{\omega}$

כאשר I מומנט ההתמד ביחס לציר

- תנ"ז של תנועה משולבת (הגוף גם זז וגם מסתובב סביב מרכז המסה): $\vec{L} = \vec{r}_{c.m.} \times \vec{p}_{c.m.} + \vec{L}_{c.m.}$

כאשר $\vec{L}_{c.m.}$ הוא התנ"ז ביחס לציר העובר במרכז המסה ושווה ל- $I_{c.m.}\vec{\omega}$

אנרגיה קינטית סיבובית:

- סביב ציר קבוע כלשהו: $E_k = \frac{1}{2}I\omega^2$

- תנועה משולבת (גוף נע ומסתובב סביב מרכז המסה): $E_k = \frac{1}{2}mv_{c.m.}^2 + \frac{1}{2}I_{c.m.}\omega^2$

- תנועה משולבת שהסיבוב אינו סביב מרכז מסה (*): $E_k = \frac{1}{2}mv_0^2 + \frac{1}{2}I_0\omega^2 + m\vec{r}_{c.m.0} \cdot (\vec{v}_0 \times \vec{\omega})$

המרת מסת הגופים לאנרגיה:
 $m_e \approx 8.19 \times 10^{-14} J (\approx 511 keV)$
 $m_p \approx 1.50 \times 10^{-10} J (\approx 938 MeV)$
 $m_{uranium} \approx 3.55 \times 10^{-8} J (\approx 225 GeV)$
 ניתן גם לרשום את היחידות של התנע של גופים כ- $\frac{eV}{c}$
 כלומר הכמות (המספר) זהה רק ביחידות נחלק ב c.
יחסות פרטית
 תיאור של מאורעות מנקודת המבט של צופים הנמצאים במערכות ייחוס שונות (אינרציאליות).

עקרונות יסוד בתורת היחסות:
 - חוקי הפיזיקה זהים בכל המערכות האינרציאליות.
 - האור אינו צריך תווך בשביל לעבור בו.
 - מהירות האור קבועה וזהה בכל מערכות הייחוס.
 - אף גוף אינו יכול לנוע יותר מהר ממהירות האור.
 - מכאן, מדידת הזמן שונה בין מערכות הייחוס.
 - הזמן הופך לקואורדינטה רביעית (ביחד עם: x, y, z).
 - שיעור טרנספורמציה.

פקטור גאמא:
 $\gamma_0 = \frac{1}{\sqrt{1-(\frac{v_0}{c})^2}} = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} ; \beta = \frac{v_0}{c}$
טרנספורמציה לורנץ למיקום והזמן:
 $x' = \gamma_0(x - v_0 t) ; y' = y ; z' = z$
 $t' = \gamma_0(t - \frac{v_0 x}{c^2}) ; \beta = \frac{v_0}{c} ; \gamma_0 = \frac{1}{\sqrt{1-(\frac{v_0}{c})^2}} = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}$
טרנספורמציה הפוכה:

$x = \gamma_0(x' + v_0 t') ; y' = y ; z' = z$
 $t = \gamma_0(t' + \frac{v_0 x'}{c^2})$
 - הצירים של המערכות **חייבים** להיות מקבילים.
 - בזמן $t = t' = 0$ **חייבים** שהראשיות מתלכדות.
 - המערכת העצמית:
 מערכת בה המאורע הנמצא במנוחה.
 - **זמן עצמי** τ מוגדר להיות הפרש הזמנים בין שני מאורעות כפי שהוא נמדד במערכת העצמית שלהם.
 - **אורך עצמי** l_0 האורך של גוף כפי שנמדד במערכת בו הגוף נמצא במנוחה.
התכווצות האורך: שינוי האורך ממערכת המנוחה
 $l = \frac{l_0}{\gamma_0}$ (העצמית) למערכת נעה
התארכות הזמן: שינוי הזמן ממערכת המנוחה (העצמית) למערכת נעה
 $\Delta t = \gamma_0 \tau$
שינוי זווית במדידת אורך:
 $\tan \theta = \gamma_0 \tan \theta'$
 - זווית ביחס לציר ה x (ציר התנועה) במערכת העצמית θ
 - זווית ביחס לציר ה x' (ציר התנועה) במערכת אחרת. **אפקט דופלר היחסותי:**

זמן המחזור של הגל:
 $T = \sqrt{\frac{1+\beta}{1-\beta}} \tau$
 אורך הגל:
 $\lambda = \sqrt{\frac{1+\beta}{1-\beta}} \lambda'$
 תדירות הגל:
 $f = \sqrt{\frac{1-\beta}{1+\beta}} f'$
 λ', f', τ - הזמן, התדירות ואורך הגל במערכת העצמית
טרנספורמציה לורנץ למהירויות:
 $v'_x = \frac{v_x - v_0}{1 - \frac{v_0 v_x}{c^2}} ; v'_y = \frac{v_y}{\gamma_0(1 - \frac{v_0 v_x}{c^2})} ; v'_z = \frac{v_z}{\gamma_0(1 - \frac{v_0 v_x}{c^2})}$
אברציה - שינוי זווית המהירות:

$\tan \theta' = \frac{\sin \theta}{\gamma_0(\cos \theta - \frac{v_0}{c})}$
 שימו לב שפה השינוי הוא בזווית של וקטור המהירות (כיוון התנועה) ולא שינוי זווית של הגוף כמו למעלה.

$z(t) = e^{-\frac{\Gamma}{2}t} \left(A e^{\sqrt{\left(\frac{\Gamma}{2}\right)^2 - \omega_0^2} t} + B e^{-\sqrt{\left(\frac{\Gamma}{2}\right)^2 - \omega_0^2} t} \right)$
מקרה (II) - ריסון קריטי:
 $\frac{\Gamma}{2} = \omega_0$
 $z(t) = (A + B \cdot t) \cdot e^{-\omega_0 t}$
 דעיכה הכי מהירה לשיווי משקל עם תנודה אחת.
מקרה (III) - ריסון חלש:
 $\frac{\Gamma}{2} < \omega_0$
 $z(t) = A e^{-\frac{\Gamma}{2}t} \cos(\tilde{\omega} t + \phi) ; \tilde{\omega} = \sqrt{\omega_0^2 - \left(\frac{\Gamma}{2}\right)^2}$
 יש תנודות דועכות, $\tilde{\omega}$ היא תדירות התנודות.

תנועה הרמונית מרוסנת ומאולצת
 בנוסף לכוח הקפיץ והמרסן נוסף **כוח מאלץ** מהצורה:
 $\vec{F}(t) = F_0 \sin(\Omega t)$
 ו- F_0 קבועים כלשהם
משוואת התנועה:
 $\ddot{z} + \Gamma \dot{z} + \omega_0^2 z = \frac{F_0}{m} \sin(\Omega t)$
פתרון משוואת התנועה:
 $x(t) = A(\Omega) \sin(\Omega t + \phi) + x_{\text{הומוגני}}(t)$
 (t) הומוגני - הוא הפתרון של תנועה הרמונית מרוסנת שמתחלק לשלושת המקרים ...
 - במצב עמיד (לאחר זמן רב) נוניח את הפתרון ההומוגני.

$A(\Omega) = \frac{\frac{F_0}{m}}{\sqrt{(\omega_0^2 - \Omega^2)^2 + \Gamma^2 \Omega^2}}$
 $\sin(\phi) = \frac{\Gamma \Omega}{\sqrt{(\omega_0^2 - \Omega^2)^2 + \Gamma^2 \Omega^2}}$
תדירות תהודה: התדירות של הכוח המאלץ עבורה $A(\Omega)$ מקסימאלי. ניתן למצא אותה ע"י נגזרת של A לפי Ω . אם $\omega_0 \ll \Gamma$ אז תדירות התהודה היא בקירוב ω_0 (תדירות התנועה ההרמונית ללא כוח מאלץ ומרסן)
תנע ואנרגיה יחסותיים:
 $\vec{p} = \gamma m \vec{v} ; E = \gamma m c^2$
 - הגודל γ קשור עכשיו למהירות הגוף עבורו נרצה לחשב את התנע ולא למעבר בין מערכות אינרציאליות שונות.
נוסחאות נוספות:
 $E^2 = |p|^2 c^2 + m^2 c^4 ; |p| = \sqrt{\gamma^2 - 1} \cdot mc$
אנרגיית מנוחה:
 $E_0 = mc^2$
אנרגיה קינטית:
 $E_k = E - E_0 = mc^2(\gamma - 1)$
 עבור חלקיקים מסוימים מסת המנוחה היא אפס (פוטון, נייטרينو) והאנרגיה הקינטית היא:
 $E = |p|c = h\nu$
 v היא התדירות ו- $h = 6.626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ קבוע פלאנק
טרנספורמציה של התנע והאנרגיה:
 $E' = \gamma_0(E - v_0 p_x) ; p'_x = \gamma_0(p_x - v_0 E/c^2)$
 $p'_y = p_y ; p'_z = p_z$
 $(p_x, p_y, p_z, \frac{E}{c})$
וקטור תנע אנרגיה:
 "גודל הוקטור" (מינור באנרגיה) זהה בכל מערכות הייחוס:

$p_x^2 + p_y^2 + p_z^2 - \left(\frac{E}{c}\right)^2 = \text{const}$
 - הנוסחה נכונה גם עבור מערכת עם יותר מגוף אחד כאשר התנע והאנרגיה הם התנע והאנרגיה של כל המערכת.
 - עבור גוף יחיד הקבוע הוא: $m^2 c^2$.
פיזור קומפטון:
 פוטון הפוגע באטום הנמצא במנוחה, לאחר הפגיעה נפלס אלקטרון וכיוון התנועה של הפוטון משתנה.
 פוטון פוגע - E_γ
 אלקטרון
 פוטון לאחר הפגיעה - E'_γ

$\frac{1}{E'_\gamma} - \frac{1}{E_\gamma} = \frac{1}{m_e c^2} (1 - \cos \theta)$
 - אנרגיית הפוטון לפני הפגיעה
 - אנרגיית הפוטון אחרי הפגיעה
 - מסת אלקטרון
 - θ זווית התנועה של הפוטון ביחס לכיוון הפגיעה.
 יחידת האלקטרון וולט: $1 \text{ eV} = 1.60 \times 10^{-19} \text{ J}$

כאשר I_0 מומנט ההתמד ביחס לציר, $\vec{v}_0$ היא מהירות הציר ו- $\vec{r}_{c.m.,0}$ הוא מיקום מרכז המסה ביחס לציר.
 (*) השימוש בנוסחה מאוד נדיר
 טבלת השוואה בין תנועה סיבובית לתנועה בקו ישר

תנועה סיבובית	תנועה בקו ישר
θ	x
$\omega = \dot{\theta}$	$v = \dot{x}$
$\alpha = \dot{\omega} = \ddot{\theta}$	$a = \dot{v} = \ddot{x}$
I	m
L	p
τ	F

לגול ללא החלקה: מהירות הנקודה שנוגעת במשטח מתאפסת (ביחס למשטח) $\leftarrow a_{c.m.} = \alpha R ; v_{c.m.} = \omega R$
 - בגל"ה החיכוך הוא סטטי ולכן אין איבוד אנרגיה.
איך נגשים לשאלות?

חוקי שימור
 דרך כוחות ומומנטים
 עושים:
 1. חוק $\vec{F} = m a_{c.m.}$
 2. משוואת מומנטים: $\Sigma \tau = I \alpha$
 3. קשר בין התאוצות, לדוגמה $a_{c.m.} = \alpha R$
 בודקים מה נשמר:
 1. אנרגיה אם כל הכוחות משמרים.
 2. תנע קווי אם סכום הכוחות החיצוניים מתאפס.
 3. תנ"א אם סכום המומנטים החיצוניים מתאפס.

תנועה הרמונית פשוטה
משוואת התנועה:
 $-k(x - x_0) = m \ddot{x}$
 ו- k הם קבועים **חיוביים** כלשהם.
 x_0 - קבוע שיכול להיות חיובי או שלילי.
 x - משתנה כלשהו, יכול להיות גם זווית או משתנה אחר.
 $\ddot{x}$ - נגזרת שניה של המשתנה.
 חייב להיות מינוס לפני k.
פתרון המשוואה:
 $x(t) = A \cos(\omega t + \phi) + x_0$
 x_0 - נקודת שיווי המשקל, הנקודה שבה $\vec{F} = 0$.
 A - אמפליטודה, המרחק המקסימאלי משווי המשקל.
 $\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$ - תדירות זוויתית
 ϕ - פאזה.
מציאת הקבועים בפתרון:
 x_0 - אפשר למצא ישירות מהקבוע שבמשוואה או למצא אותו מסכום הכוחות שווה לאפס.

$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} = \sqrt{\frac{\text{של המקדם } x}{\text{של המקדם } \ddot{x}}}$
 φ, A מוצאים מתנאי התחלה $x(0)$ ו- $\dot{x}(0)$.
נוסחה למהירות המקסימאלית:
מטוטלת פיזיקאלית:
 גוף קשיח שתולים בנקודה כלשהיא
 $\omega = \sqrt{\frac{mgr_{c.m.}}{I_0}}$
 I_0 - מומנט ההתמד בנקודת התלה

האנרגיה:
 $E = \frac{1}{2} m \dot{x}^2 + \frac{1}{2} k (x - x_0)^2 = \frac{1}{2} m A^2$
 - האנרגיה הכוללת קבועה ואפשר לחשב אותה דרך האמפליטודה.
 - חילופי האנרגיה בין האנרגיה הקינטית לפוטנציאלית, הפוטנציאלית מקסי' בקצוות והקינטית בשיווי משקל.
בור פוטנציאל: כאשר גוף נע בסביבה קרובה מאוד למינימום של הפוטנציאל (האנרגיה הכללית שלו גדולה רק במעט מהאנרגיה הפוטנציאלית במינימום) אז הוא מבצע תנועה הרמונית בתדירות:

$\omega_0 = \sqrt{\frac{U''(x_0)}{m}}$
 x_0 - מיקום נק' המינימום, ו- $U''(x_0)$ נגזרת שניה בנקודה.
תנועה הרמונית מרוסנת
 בנוסף לכוח הקפיץ נוסף **כוח מרסן** מהצורה: $F = -\lambda v$
 v - מהירות הגוף ו- λ קבוע.
משוואת התנועה:
 $\ddot{z} + \Gamma \dot{z} + \omega_0^2 z = 0$
 כאשר $z = x - x_0, \Gamma = \frac{\lambda}{m}, \omega_0^2 = \frac{k}{m}$
פתרון המשוואה מתחלק לשלושה מקרים:
מקרה (I) - ריסון חזק: $\frac{\Gamma}{2} > \omega_0$
 אין תנודות