

## הוראות לדף הנוסחאות



### הוראות הדפסה!

את הדף יש להדפיס עם שוליים מותאמות 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.

$$\vec{\nabla} \times \vec{F} = \left( \frac{1}{r} \frac{\partial F_z}{\partial \theta} - \frac{\partial F_\theta}{\partial z} \right) \hat{r} + \left( \frac{\partial F_r}{\partial z} - \frac{\partial F_z}{\partial r} \right) \hat{\theta} + \frac{1}{r} \left( \frac{\partial (r F_\theta)}{\partial r} - \frac{\partial F_r}{\partial \theta} \right) \hat{z}$$

בדוריות (\*):

$$\vec{\nabla} \times \vec{F} = \frac{1}{r \sin \varphi} \left( \frac{\partial}{\partial \varphi} (F_\theta \sin \varphi) - \frac{\partial F_\varphi}{\partial \theta} \right) \hat{r} + \frac{1}{r} \left( \frac{\partial}{\partial r} (r F_\varphi) - \frac{\partial F_r}{\partial \varphi} \right) \hat{\theta} + \frac{1}{r} \left( \frac{\partial}{\partial \theta} (r F_\varphi) - \frac{\partial F_r}{\partial \varphi} \right) \hat{\varphi}$$

**שימו לב שהזווית  $\varphi$  עם ציר ה-z והזווית  $\theta$  עם ציר ה-x**  
**תנועה בקו ישר (מימד אחד)**

**מהירות רגעית:**  $v(t) = \frac{dx}{dt} = \dot{x}$

**מהירות ממוצעת:**  $\bar{v} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{x_f - x_i}{t_f - t_i}$

**תאוצה רגעית:**  $a(t) = \frac{dv}{dt} = \dot{v} = \frac{d^2x}{dt^2} = \ddot{x}$

**תאוצה ממוצעת:**  $\bar{a} = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v_f - v_i}{t_f - t_i}$

**קשרים הפוכים:**  $x(t) = \int v(t) dt$

$v(t) = \int a(t) dt$

- את האינטגרל אפשר לעשות לא מסוים (בלי גבולות) ואז צריך להוסיף קבוע או מסוים (עם גבולות).  
 מיקום ומהירות כתלות בזמן **בתאוצה קבועה בלבד**:

$x(t) = x_0 + v_0 \cdot t + \frac{1}{2} a t^2$  ;  $v(t) = v_0 + a t$

שטחים מתחת לגרף הפונקציה (גם בתאוצה משתנה):  
 - השטח מתחת לגרף הפונקציה של המהירות כתלות בזמן שווה להעתק, כאשר שטח מתחת לציר הזמן מחושב כשלילי (אם מחשבים אותו כחיובי אז מקבלים את הדרך).  
 - השטח מתחת לגרף של התאוצה כתלות בזמן שווה לשינוי המהירות (שטח מתחת לציר הזמן מחושב כשלילי).

**תנועה במרחב (דו ותלת מימד):**

**וקטור המיקום:**  $\vec{r} = x\hat{x} + y\hat{y} + z\hat{z}$

**וקטור ההעתק:**  $\Delta \vec{r} = \vec{r}_2 - \vec{r}_1$

**וקטור המהירות הממוצעת (velocity):**  $\bar{\vec{v}} = \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t}$

**וקטור המהירות הרגעית (velocity):**  $\vec{v} = \frac{d\vec{r}}{dt}$

- וקטור המהירות הרגעית תמיד בכיוון משיק למסלול

**וקטור התאוצה הממוצעת:**  $\bar{\vec{a}} = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}$

**וקטור התאוצה הרגעית:**  $\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt}$

**גודל המהירות (Speed):**  $|\vec{v}| = \frac{dS}{dt}$ , כאשר S זה הדרך.

משוואת מסלול (דו מימד): פונקציה מהצורה  $y(x)$ .  
 סרטוט של הפונקציה הוא המסלול של הגוף במישור. ניתן למצא את המשוואה באמצעות בידוד משתנה הזמן מהפונקציה  $x(t)$  והצבה ב  $y(t)$ .

**תאוצה משיקית:**  $|\vec{a}_t| = \frac{d|\vec{v}|}{dt} = \frac{d|\vec{v}|}{|\vec{v}|} \vec{v}$  ;  $\vec{a}_t = \frac{(\vec{a} \cdot \vec{v})}{|\vec{v}|^2} \vec{v}$

- התאוצה המשיקית היא ההרכיב של התאוצה שמשיק למהירות (או למסלול) והיא משנה רק את גודל המהירות.

**תאוצה נורמלית:**  $\vec{a}_n = \vec{a} - \vec{a}_t$

$|\vec{a}_n| = |\vec{a} - \vec{a}_t| = \frac{|\vec{a} \times \vec{v}|}{|\vec{v}|}$

- התאוצה הנורמלית היא ההרכיב של התאוצה שמואנך למהירות (או למסלול) והיא משנה רק את כיוון המהירות.

**רדיוס עקמומיות:**  $R = \frac{|\vec{v}|^2}{|\vec{a}_n|}$

**תנועה יחסית (טרנס' גליליי)**

המיקום, המהירות והתאוצה של גוף 1 ביחס לגוף 2:

$\vec{r}_{1,2} = \vec{r}_1 - \vec{r}_2$  ;  $\vec{v}_{1,2} = \vec{v}_1 - \vec{v}_2$  ;  $\vec{a}_{1,2} = \vec{a}_1 - \vec{a}_2$

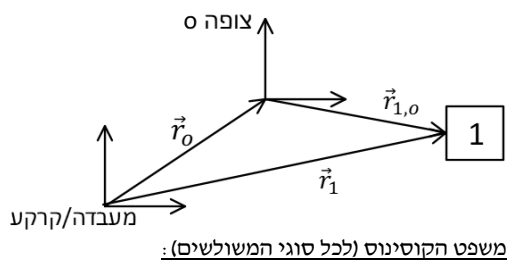
הנוסחה וקטורית אבל אפשר להשתמש בכל ציר בנפרד. שיטה שניה - שימוש בתרשים וקטורים:

1. נצייר ראשית ונשרטט את הוקטורים  $\vec{r}_1$  ו-  $\vec{r}_0$  יוצאים מהראשית לפי האינפורמציה הנתונה בתרגיל (הגודל והכיוון שלהם).

2. נצייר ראשית צירים של הצופה בקצה הוקטור  $\vec{r}_0$ .

3. נשרטט את הוקטור  $\vec{r}_{1,0}$  מהראשית של הצופה לפי הנתונים בתרגיל וכך שהראש שלו נפגש עם הראש של הוקטור  $\vec{r}_1$ .

4. נעשה טריגו ונמצא את תנוגי הוקטורים החסרים.



משפט הקוסינוס (לכל סוגי המשולשים):

$\cos \varphi = \frac{z}{r} = \frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}}$

$dl = dr / r \sin \varphi d\theta / r d\varphi$

$ds = r^2 \sin \varphi d\theta d\varphi$  (כדור מלא / קליפה כדורית עבה)

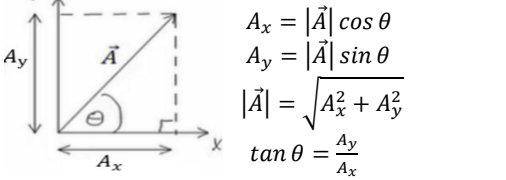
**צפיפות נפחית/משטחית/אורכית:**  $\rho = \frac{M}{V}$  ;  $\sigma = \frac{M}{S}$  ;  $\lambda = \frac{M}{l}$

V, S, l הם נפח, שטח ואורך הגוף.  
 אלמנט מסה אינפיניטסימלי אורכי/משטחי/נפחי:

$dm = \lambda dl / \sigma ds / \rho dv$

**וקטורים** - ראו קואורדינטות

**פירוק לרכיבים:**



**כפל בסקלר:**  $\alpha \vec{A} = (\alpha A_x, \alpha A_y)$

**מכפלה סקלרית:** שתי דרכים לביצוע המכפלה:

$\vec{A} \cdot \vec{B} = A_x \cdot B_x + A_y \cdot B_y = |\vec{A}| \cdot |\vec{B}| \cdot \cos \alpha$

-  $\alpha$  זווית בין הוקטורים.  
 - תוצאת המכפלה היא תמיד סקלר (ולא וקטור).  
 - מכפלה בין וקטורים מאונכים מתאפסת, זו דרך לבדוק **האם וקטורים מאונכים**.  
**פתיחת סוגרים והעלאה בריבוע:**

$\vec{A} \cdot (\vec{B} + \vec{C}) = \vec{A} \cdot \vec{B} + \vec{A} \cdot \vec{C}$

$(\vec{A} + \vec{B})^2 = |\vec{A}|^2 + 2\vec{A} \cdot \vec{B} + |\vec{B}|^2$

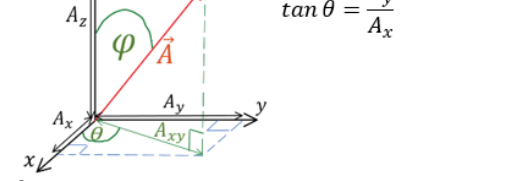
**זווית בין שני וקטורים:**  $\cos \alpha = \frac{A_x B_x + A_y B_y}{|\vec{A}| \cdot |\vec{B}|} = \frac{\vec{A} \cdot \vec{B}}{|\vec{A}| \cdot |\vec{B}|}$

**וקטור יחידה:**  $\hat{A} = \frac{\vec{A}}{|\vec{A}|}$

**וקטור בשלושה מימדים:**

$0 \leq \varphi \leq \pi$   
 $0 \leq \theta \leq 2\pi$

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



$\sqrt{A_x^2 + A_y^2 + A_z^2}$  ;  $\cos \varphi = \frac{A_z}{|\vec{A}|} = \frac{A_z}{\sqrt{A_x^2 + A_y^2 + A_z^2}}$

**פירוק לרכיבים:**  $A_{xy} = |\vec{A}| \sin \varphi$  ;  $A_z = |\vec{A}| \cos \varphi$

$A_x = |\vec{A}| \sin \varphi \cos \theta$  ;  $A_y = |\vec{A}| \sin \varphi \sin \theta$

**מכפלה וקטורית:**

- **דרך 1 לעשות את המכפלה עם דטרמיננטה:**

$\vec{A} \times \vec{B} = \begin{vmatrix} \hat{x} & \hat{y} & \hat{z} \\ A_x & A_y & A_z \\ B_x & B_y & B_z \end{vmatrix}$

- **דרך 2 לפי גודל וכיוון בנפרד:**

$|\vec{A} \times \vec{B}| = |\vec{A}| |\vec{B}| |\sin \alpha|$

גודל המכפלה הוא: **גודל כלל יד ימין:**

וכיוון לפי כלל יד ימין:



**שימו לב** שאתם עם יד ימין!!

- בתמונה השמאלית, קודם לעשות אקדה ואחר כך לפתוח את האמה!

**גרדיאנט בקרטזיות:**  $\vec{\nabla} f = \frac{\partial f}{\partial x} \hat{x} + \frac{\partial f}{\partial y} \hat{y} + \frac{\partial f}{\partial z} \hat{z}$

**גרדיאנט בגליליות:**  $\vec{\nabla} f = \frac{\partial f}{\partial r} \hat{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial f}{\partial \theta} \hat{\theta} + \frac{\partial f}{\partial z} \hat{z}$

**בדוריות (\*):**  $\vec{\nabla} f = \frac{\partial f}{\partial r} \hat{r} + \frac{1}{r \sin \varphi} \frac{\partial f}{\partial \theta} \hat{\theta} + \frac{1}{r \sin \varphi} \frac{\partial f}{\partial \varphi} \hat{\varphi}$

**רוטור (Rot/Curl):** בקרטזיות:

$\vec{\nabla} \times \vec{F} = \begin{vmatrix} \hat{x} & \hat{y} & \hat{z} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ F_x & F_y & F_z \end{vmatrix} = \left( \frac{\partial F_z}{\partial y} - \frac{\partial F_y}{\partial z} \right) \hat{x} - \left( \frac{\partial F_z}{\partial x} - \frac{\partial F_x}{\partial z} \right) \hat{y} + \left( \frac{\partial F_y}{\partial x} - \frac{\partial F_x}{\partial y} \right) \hat{z}$

**בגליליות:**

**מבוא מתמטי**

**GOOL**

**ניצב שמול יתר:**  $\sin \alpha = \frac{a}{c}$

**ניצב ליד יתר:**  $\cos \alpha = \frac{b}{c}$

**ניצב שמול ליד ניצב:**  $\tan \alpha = \frac{a}{b}$

**ניצב ליד ניצב שמול:**  $\cot \alpha = \frac{b}{a}$

**ניצב ליד ניצב שמול:**  $\tan \alpha = \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha}$  ;  $\cot \alpha = \frac{1}{\tan \alpha} = \frac{\cos \alpha}{\sin \alpha}$

$a^2 + b^2 = c^2$

|                                                                                            |                      |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|
| $\sin(90^\circ - \alpha) = \cos \alpha$ ; $\cos(90^\circ - \alpha) = \sin \alpha$          | $90^\circ - \alpha$  |
| $\tan(90^\circ - \alpha) = \cot \alpha$ ; $\cot(90^\circ - \alpha) = \tan \alpha$          | $90^\circ - \alpha$  |
| $\sin(90^\circ + \alpha) = \cos \alpha$ ; $\cos(90^\circ + \alpha) = -\sin \alpha$         | $90^\circ + \alpha$  |
| $\tan(90^\circ + \alpha) = -\cot \alpha$ ; $\cot(90^\circ + \alpha) = -\tan \alpha$        | $90^\circ + \alpha$  |
| $\sin(180^\circ - \alpha) = \sin \alpha$ ; $\cos(180^\circ - \alpha) = -\cos \alpha$       | $180^\circ - \alpha$ |
| $\tan(180^\circ - \alpha) = -\tan \alpha$ ; $\cot(180^\circ - \alpha) = -\cot \alpha$      | $180^\circ - \alpha$ |
| $\sin(-\alpha) = -\sin \alpha$ ; $\cos(-\alpha) = \cos \alpha$                             | $-\alpha$            |
| $\tan(-\alpha) = -\tan \alpha$ ; $\cot(-\alpha) = -\cot \alpha$                            | $-\alpha$            |
| $\sin 2\alpha = 2 \sin \alpha \cos \alpha$                                                 | $2\alpha$            |
| $\cos 2\alpha = \cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha = 1 - 2 \sin^2 \alpha = 2 \cos^2 \alpha - 1$ | $2\alpha$            |
| $\sin(\alpha \pm \beta) = \sin \alpha \cos \beta \pm \sin \beta \cos \alpha$               | $\alpha \pm \beta$   |
| $\cos(\alpha \pm \beta) = \cos \alpha \cos \beta \mp \sin \alpha \sin \beta$               | $\alpha \pm \beta$   |

**סכום והפרש של פונקציות:**

$\sin \alpha \pm \sin \beta = 2 \sin \left( \frac{\alpha \pm \beta}{2} \right) \cos \left( \frac{\alpha \mp \beta}{2} \right)$

$\cos \alpha + \cos \beta = 2 \cos \left( \frac{\alpha + \beta}{2} \right) \cos \left( \frac{\alpha - \beta}{2} \right)$

$\cos \alpha - \cos \beta = 2 \sin \left( \frac{\alpha + \beta}{2} \right) \sin \left( \frac{\alpha - \beta}{2} \right)$

**פתרון משוואות טריגונומטריות:**

|                               |                        |
|-------------------------------|------------------------|
| $x_1 = \alpha + 2\pi k$       | $\sin x = \sin \alpha$ |
| $x_2 = \pi - \alpha + 2\pi k$ | $\sin x = \sin \alpha$ |
| $x_1 = \alpha + 2\pi k$       | $\cos x = \cos \alpha$ |
| $x_2 = -\alpha + 2\pi k$      | $\cos x = \cos \alpha$ |
| $x = \alpha + \pi k$          | $\tan x = \tan \alpha$ |

**נגזרות ואינטגרליים:**

**נגזרת של מכפלה:**

$y(x) = f(x)g(x) \rightarrow y'(x) = f'(x)g(x) + f(x)g'(x)$

- כלל שרשרת: אם y היא פונקציה של x ו-x הוא פונקציה של t אז:

$\frac{dy}{dt} = \frac{dy}{dx} \cdot \frac{dx}{dt}$

**נגזרות נוספות:**  $\frac{d}{dx} \left( \frac{1}{x} \right) = -\frac{1}{x^2}$  ;  $\frac{d}{dx} (\sin x) = \cos x$  ;  $\frac{d}{dx} (\cos x) = -\sin x$  ;  $\frac{d}{dx} (e^x) = e^x$

$\frac{d}{dx} (\ln(x)) = \frac{1}{x}$

- **אינטגרל** היא פעולה הפוכה לנגזרת, מבצע סכימה על ערכי הפונקציה ונותן את השטח מתחת לגרף הפונקציה.

אינטגרל לא מסוים- מוסיפים קבוע לתוצאת האינטגרל.

אינטגרל מסוים- מציבים גבולות בתוצאה של האינטגרל:

$\int_a^b x^n dx = \frac{x^{n+1}}{n+1} \Big|_a^b = \frac{b^{n+1}}{n+1} - \frac{a^{n+1}}{n+1}$

**קואורדינטות גליליות:**  $(r, \theta, z)$

$x = r \cos \theta$

$y = r \sin \theta$

$z = z$

$r = \sqrt{x^2 + y^2}$

$\tan \theta = \frac{y}{x}$

$dl = dr / r d\theta / dz$  (טבעת) /  $dr dz$  (קליפה גלילית דקה) /  $rd\theta dz$  (דיסקה)

$ds = r dr d\theta$  (קליפה גלילית עבה)

**קואורדינטות כדוריות:**  $(r, \theta, \varphi)$

$z = r \cos \varphi$

$x = r \sin \varphi \cos \theta$

$y = r \sin \varphi \sin \theta$

$r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$

$\tan \theta = \frac{y}{x}$



$c^2 = a^2 + b^2 - 2ab\cos(\gamma)$   
 $\gamma$  – הזווית מול הצלע  $c$  (יכולה להיות כל צלע במשולש).  
משפט הסינוסים (לכל סוגי המשולשים):

$$\frac{a}{\sin \alpha} = \frac{b}{\sin \beta} = \frac{c}{\sin \gamma}$$

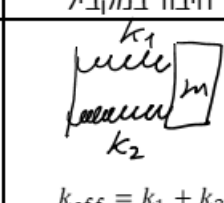
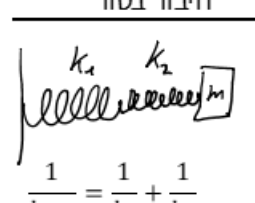
$\gamma$  הזווית מול הצלע  $c$ ,  $\beta$  הזווית מול  $b$ ,  $\alpha$  הזווית מול  $a$  המהירות שמודד מד לייזר:

$$\vec{v} = \frac{d}{dt} |\vec{r}| = \frac{\dot{x} \cdot \hat{x} + \dot{y} \cdot \hat{y}}{\sqrt{x^2 + y^2}}$$

מהירות זו היא הרכיב הרדיאלי של המהירות או הרכיב של המהירות שמקבל לקטור המיקום של הגוף ביחס לצופה המודד.

### GOOL

**חוק הוק – הכוח של קפיץ:**  $F = -k(x - x_0)$   
כאשר  $x$  הוא מיקום הגוף ו- $x_0$  המיקום שבו הקפיץ רפוי.

| חיבור במקביל                                                                        | חיבור בטור                                                                          |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
|  |  |

### תנועה מעגלית (ברדיוס קבוע)

**דרך בתנועה מעגלית:**  $S = \Delta \theta \cdot R$   
- הדרך בתנועה מעגלית היא אורך הקשת שעבר הגוף במעגל.  $\Delta \theta$  היא שינוי הזווית או הזווית שמול הקשת ויש להציב אותה ברדיאנים!

**גודל המהירות הקווית הרגעית (speed):**  $v(t) = \frac{ds}{dt}$   
- כיוון המהירות תמיד משיק למעגל

**מהירות זוויתית:**  $\omega = \frac{d\theta}{dt} = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$   
-  $f$  – התדירות,  $T$  – זמן המחזור והם מוגדרים רק בתנועה מעגלית קצובה (גודל המהירות קבוע)

**קשר בין המהירות הקווית לזוויתית:**  $v = \omega R$   
**תאוצה רדיאלית (למרכז המעגל):**  $a_r = \frac{v^2}{R} = \omega^2 R$

**הכוחות למרכז המעגל:**  $\Sigma F_{\text{למרכז}} = m \frac{v^2}{R} = m \omega^2 R$   
**תאוצה זוויתית:**  $\alpha = \frac{d\omega}{dt}$

**תאוצה משיקית (רק בתנועה לא קצובה):**  $a_\theta = \frac{d|\vec{v}|}{dt} = \alpha R$   
**הגובה במעגל אנכי:**  $h = R(1 - \cos \theta)$

- כאשר  $h$  ו- $\theta$  נמדדים מתחתית המעגל.  
**הכוח הצנטריפוגלי:**  $F_r = m \omega^2 R$

- בכיוון החוצה מהמעגל.  
שימו לב שהכוח הצנטריפוגלי הוא כוח מדומה והוא מגיע מדרך הסתכלות שונה על תנועה מעגלית של צופה המסתובב עם המערכת. בצורת ההסתכלות הזו אין לגוף תאוצה רדיאלית.

**וקטור המיקום:**  $\vec{r} = R \cos \theta \hat{x} + R \sin \theta \hat{y}$   
**הקשר בכללי בין המהירות הקווית לזוויתית:**  $\vec{v} = \vec{\omega} \times \vec{r}$   
**הקשר הכללי בין התאוצה המשיקית לתאוצה הזוויתית:**  $\vec{a}_\theta = \vec{\alpha} \times \vec{r}$

### GOOL

**קואורדינטות פולריות**  
 $x = r \cos \theta$  ;  $y = r \sin \theta$   
 $r = \sqrt{x^2 + y^2}$  ;  $\tan \theta = \frac{y}{x}$   
 $\hat{r} = \cos \theta \hat{x} + \sin \theta \hat{y}$  ;  $\hat{\theta} = -\sin \theta \hat{x} + \cos \theta \hat{y}$   
 $\vec{r} = x\hat{x} + y\hat{y} = r\hat{r}$  ;  $\vec{v} = \dot{r}\hat{r} + r\dot{\theta}\hat{\theta}$   
 $\vec{a} = (\ddot{r} - r\dot{\theta}^2)\hat{r} + (2\dot{r}\dot{\theta} + r\ddot{\theta})\hat{\theta}$

### GOOL

**כוחות מדומים**  
כוח מדומה מוסיפים רק כאשר **הצופה** נמצא בתאוצה (מערכת לא אינרציאלית). אם הצופה לא בתאוצה (מערכת אינרציאלית) אין כוחות מדומים ולא תלוי בתנועת הגוף. החוק השני של ניוטון עבור צופה נמצא בתאוצה:

$$-m\vec{a}_0 + \Sigma \vec{F}_{\text{אמיתיים}} = m\vec{a}'$$

$\vec{a}'$  היא תאוצת הגוף ביחס לצופה.

אמיתיים  $\Sigma \vec{F}$  הם כוחות שיש מי שמפעיל אותם, מופיעים גם במערכת המעבדה.

" $-m\vec{a}_0$ " – הוא הכוח המדומה כאשר  $m$  היא מסת הגוף הנמדד ו- $\vec{a}_0$  היא תאוצת הצופה.

הכוחות מדומים הנוספים במקרה של צופה מסתובב במהירות זוויתית קבועה:

**הכוח הצנטריפוגלי:**  $\vec{F} = m\omega^2 r \hat{r}$   
או בצורה יותר כללית  $\vec{F} = -m\vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{r})$   
**כוח קוריאוлис:**  $\vec{F}_c = -2m\vec{\omega} \times \vec{v}'$   
כאשר  $\vec{v}'$  בשתי הנוסחאות  $\omega$  הוא של הצופה (ולא של הגוף)

$\vec{v}'$  – מהירות הגוף ביחס לצופה.

$\vec{r}$  – וקטור המיקום של הגוף.  
כאשר הצופה מסתובב במהירות זוויתית **משתנה** אז נוסף

את כוח אוילר:  $\vec{F} = -m\vec{\omega} \times \vec{v}'$  (שימו לב שיש נגזרת בזמן מעל אומגה)

### GOOL

**כוח גרר הוא כוח מהצורה:**  $\vec{F} = -k\vec{v}$   
כאשר  $\vec{v}$  היא מהירות הגוף ו- $k$  הוא קבוע כלשהו.

**משוואת התנועה** – משוואה הכוללת את  $x$ ,  $v$  ו- $a$ . בדרכ מגיעים אליה ממשוואת הכוחות.

**מהירות סופית** – המהירות הקבועה שהגוף מגיע אליה לאחר זמן רב. (תאוצה שווה לאפס)  
**כוח סטוקס** – כוח גרר שפועל על **כדור בתוך נוזל**:

$$\vec{F}_v = -6\pi\eta R \vec{v}$$

$\eta$  – צמיגות הנוזל,  $R$  – רדיוס הכדור  
**כוח ציפה:** פועל על גוף בנוזל. כיוונו הפוך לכוח הכובד.

$$F_b = \rho_l V g$$

כאשר  $\rho_l$  היא צפיפות הנוזל ו- $V$  הוא נפח הגוף.

### GOOL

**עבודה ואנרגיה**  
עבודה של כוח קבוע:  $W = \vec{F} \cdot \Delta \vec{r} = |\vec{F}| \cdot |\Delta \vec{r}| \cdot \cos \alpha = F_x \Delta x + F_y \Delta y + F_z \Delta z$   
כאשר  $\alpha$  היא הזווית בין הכוח להעתק.

- העבודה של כוח שמאונך להעתק (לתנועה) מתאפסת.  
- אם הגוף לא זז אין עבודה (לכן העבודה של החיכוך הסטטי היא תמיד אפס).

**הקשר בין העבודה כוללת לאנרגיה קינטית:**  $W_{SF} = \Delta E_k$   
 $E_k = \frac{1}{2}mv^2$   
**כוח משמר:**

- **העבודה שמבצע כוח משמר אינה תלויה במסלול**, היא תלויה רק בנקודת ההתחלה והסיום של התנועה.

- העבודה במסלול סגור מתאפסת.  
יש לו אנרגיה פוטנציאלית כך ש:  $W_c = -\Delta U$

האנרגיה הפוטנציאלית הכובדית:  $U_g = mgh$   
האנרגיה הפוטנציאלית האלסטית:  $U_{el} = \frac{1}{2}kx^2$

כאשר  $x$  ההתארכות הקפיץ ממצב רפוי ו- $k$  קבוע הקפיץ.  
- חוץ מ- $U_g$  ו- $U_{el}$  יכולים להיות עוד כוחות משמרים ועבורם יהיו עוד אנרגיות פוטנציאליות

**אנרגיה (מכאנית) כללית:**  $E = E_k + U$   
-  $U$  סכום כל האנרגיות הפוטנציאליות שקיימות בבעיה.

**משפט עבודה אנרגיה:**  $E_i + W_{NC} = E_f$   
 $W_{NC}$  העבודה של כל הכוחות הלא משמרים חוק שימור האנרגיה:

אם כל הכוחות משמרים (או העבודה של הכוחות הלא משמרים שווה לאפס) אז האנרגיה הכללית נשמרת **העבודה של כוח לא קבוע:**

$$W = \int \vec{F} \cdot d\vec{r} = \int (F_x dx + F_y dy + F_z dz)$$

בשביל הנוסחה צריך גם משוואה של המסלול.

דוגמה בדרך-מימד: נתון  $x(t) = x^5$ , באמצעות המשוואה עוברי משתנה אחד. בדוגמה, נציב באינטגרל במקום  $y$  את  $x^5$  ו- $dx$  נגזרת  $dy$ , בדוגמה  $5x^4 dx$ .

הגבולות של המשתנה אליו עברנו (בדוגמה גבולות של  $x$ ) **איד בודקים אם כוח הוא משמר:**

אם ורק אם  $\vec{F} \times \vec{r} = 0$ , אז הכוח משמר.  
נוסחת הרוטור בפרק וקטורים.

הערה: צריך שכל רכיב יתאפס בנפרד.

**נקודת שיווי משקל מתקיימת כאשר:**  $\Sigma \vec{F} = 0$  או  $\frac{\partial U}{\partial x} = 0$   
שיווי משקל יציב (הגוף חוזר בתזוזה קטנה):  $U''_x > 0$   
שיווי משקל רופף (הגוף מתרחק בתזוזה קטנה):  $U''_x < 0$   
שיווי משקל אדיש (לא חוזר ולא ממשיך) כשאנרגיה קבועה

- אם יש כמה ממדים אז  $\vec{U} = 0$   
שיווי משקל יציב – כל הנגזרות השניות גדולות מאפס

שיווי משקל רופף – כל הנגזרות השניות קטנות מאפס

אוכף-חלק מהנגזרות השניות גדול מאפס וחלק קטן מאפס **חישוב אנרגיה פוטנציאלית מכוח משמר:**

נתונה פונקציית כוח וצריך למצוא  $U$  שמקיימת  $\frac{\partial U}{\partial x} = -F_x$  וגם  $\frac{\partial U}{\partial y} = -F_y$  וגם  $\frac{\partial U}{\partial z} = -F_z$

שלב 1 – נעשה  $U = -\int F_x dx + g(y, z)$   
כאשר  $g(y, z)$  היא פונקציה כללית שתלויה רק ב- $y, z$ .

דוגמה:  $\vec{F}(x, y, z) = 2xyz\hat{x} + (zx^2 + 3)\hat{y} + yx^2\hat{z}$   
 $U = -\int 2xyz dx + g(y, z) = -x^2yz + g(y, z)$

שלב 2 – נעשה  $\frac{\partial U}{\partial y} = -F_y$  ומשם נמצא את  $g(y, z)$   
באמצעות אינטגרל על  $y$  ונוסיף  $h(z)$ . בדוגמה:

נציב ב- $\frac{\partial U}{\partial y} = -F_y$ :  $-x^2z + \frac{\partial g(y, z)}{\partial y} = -(zx^2 + 3)$   
נעשה אינטגרל ונוסיף  $h(z)$ :  $g(y, z) = -3y + h(z)$   
עכשיו  $U = -x^2yz - 3y + h(z)$

שלב 3 – נעשה  $\frac{\partial U}{\partial z} = -F_z$  ומשם נמצא את  $h(z)$  באמצעות אינטגרל על  $z$  ונוסיף קבוע. בדוגמה:

נציב ב- $\frac{\partial U}{\partial z} = -F_z$ :  $-x^2y + \frac{\partial h(z)}{\partial z} = -yx^2$   
נעשה אינטגרל ונוסיף קבוע:  $h(z) = C$

קבלנו:  $U = -x^2yz - 3y + C$   
שלב 4 – בשביל למצוא את  $C$  צריך תנאי על האנרגיה לדוגמה  $U(0,0,0) = 0$ , אם אין תנאי נשאר את  $C$ .

- אם אין תלות ב- $Z$  בבעיה אז רק שלבים 1-2 וקבוע.

### GOOL

**הספק ממוצע:**  $P_{avg} = \frac{W}{\Delta t}$   
**הספק רגעי:**  $P = \frac{dW}{dt} = \vec{F} \cdot \vec{v} = |\vec{F}| |\vec{v}| \cos \alpha$   
 $\vec{F}$  – הכוח שפועל על הגוף ו- $\vec{v}$  היא מהירות הגוף.

**נצילות:**  $\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{W_{out}}{E_{in}}$   
כאשר  $out$  מצייין את החלק המנוצל על ידי המערכת ו- $in$  מצייין את כל מה שמוקשקע.

### GOOL

**מתקן ותנע**  
התנע של גוף:  $\vec{p} = m\vec{v}$   
הניסוח הכללי יותר לחוק השני של ניוטון:  $\Sigma \vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt}$   
המתקן של כוח:  $\vec{J} = \int \vec{F} dt$

המתקן הוא השטח מתחת לגרף של הכוח כתלות בזמן (לא לבלבל עם התנע שהיא השטח מתחת לגרף של הכוח כתלות במיקום).

המתקן הכולל שפועל על גוף שווה לשינוי בתנע שלו:  $\vec{J}_{SF} = \Delta \vec{p}$   
חוק שימור התנע: אם סכום הכוחות החיצוניים על מערכת גופים מתאפס אז התנע הכולל של המערכת נשמר.

הנוסחה לשימור תנע:  $m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2 = m_1 \vec{u}_1 + m_2 \vec{u}_2$   
בד"כ רושמים את הנוסחה פשוט לכל ציר בנפרד.

**התנגשות אלסטית:** יש גם שימור אנרגיה ונוסיף למשוואות התנע את המשוואה:  $m_1 v_1^2 + m_2 v_2^2 = m_1 u_1^2 + m_2 u_2^2$   
אם ההתנגשות חזיתית (במימד אחד) אז במקום המשוואה של האנרגיה נרשום:

$v_1 + u_1 = v_2 + u_2$   
**התנגשות אלסטית לא חזיתית בין שני גופים בעלי מסות שוות ואחד הגופים במנוחה לפני ההתנגשות:** הזווית בין המהירויות אחרי ההתנגשות תהיה 90 מעלות.

**התנגשות פלסטית** (שני הגופים נעים יחדיו לאחר ההתנגשות):  $m_1 v_1 + m_2 v_2 = (m_1 + m_2) u$   
בהתנגשות פלסטית לא יכול להיות שימור אנרגיה.

התנגשויות שהן לא פלסטיות ולא אלסטיות: אין שימור אנרגיה והגופים לא נעים יחדיו. יהיה רק שימור תנע.

**התנגשויות קצרות:** ברוב ההתנגשויות הזמן של ההתנגשות מאוד קצר ולכן ניתן להזניח את ההשפעה (המתקן) של כוחות קבועים כמו הכובד.

**מקדם תקופה:**  $e = \frac{u_2 - u_1}{v_1 - v_2}$   
בין 0 ל-1, ככל שיותר גבוה יותר אנרגיה נשמרת אך לא ניתן לדעת כמה. שווה 1 באלסטית ו-0 בפלסטית.

**התנגשויות ללא שימור תנע:** אם בפגיעה הנורמל גדול מאוד אז לא נזיח אותו ונחשב את המתקן שלו והשינוי בתנע של המערכת כתוצאה מכך. בנוסף גם החיכוך הקינטי יכול להיות מאוד גדול בעקבות הנורמל ונחשב גם בו.

### GOOL

**הנוסחה  $\Sigma \vec{F} = m\vec{a}$**  לא נכונה עבור גוף שהמסה שלו משתנה. נעבור לניסוח הכללי יותר של חוק שני:  $\Sigma \vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt}$   
**נוסחה כללית לתנועה גופים שפולטים מסה:**

$$\Sigma \vec{F}_{ext} = M(t) \frac{d\vec{v}}{dt} + \vec{v}_{rel} \frac{dm}{dt}$$

כאשר  $\frac{dm}{dt}$  הוא קצב הפליטה (חיובי) כאשר חומר יוצא מהגוף ושילי אם חומר נכנס לגוף).

$\vec{v}_{rel}$  – מהירות החומר שנפלט ביחס לגוף (אם החומר נפלט אחורה אז היא צריכה להיות שלילית)

$ext$  – הכוונה לסכום הכוחות החיצוניים

### GOOL

**מרכז מסה**  
מיקום מרכז המסה:  $\vec{r}_{c.m.} = \frac{m_1 \vec{r}_1 + m_2 \vec{r}_2}{m_1 + m_2}$   
ניתן לרשום אותה לכל רכיב בנפרד, לדוגמה לרכיב x:

$$x_{c.m.} = \frac{m_1 x_1 + m_2 x_2}{m_1 + m_2}$$

מהירות מרכז המסה:  $\vec{v}_{c.m.} = \frac{m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2}{m_1 + m_2}$   
תאוצת מרכז המסה:  $\vec{a}_{c.m.} = \frac{m_1 \vec{a}_1 + m_2 \vec{a}_2}{m_1 + m_2}$

עבור יותר משני גופים הנוסחאות ממשיכה בהתאמה. **מספר גופים שפועלים (לא נקודתיים):** עושים מרכז מסה בין מרכזי המסה.

**גוף עם חור:** נעשה מרכז מסה של הגוף המלא עם מרכז מסה של החור כאשר המסה של החור שלילית.

תאוצת מרכז המסה תלויה רק בכוחות החיצוניים:  $\Sigma F_{ext} = m a_{c.m.}$

אם אין כוחות חיצוניים (ומרכז המסה במנוחה בהתחלה) אז מיקום מרכז המסה נשמר. ניתן לעשות "שימור מרכז מסה" לחשב אותו בהתחלה ובסוף ולהשוות. בשביל למצוא מרכז מסה של גוף גדול נשתמש באינטגרל:

$$x_{c.m.} = \int x dm$$

כנ"ל לגבי  $y$  ו- $z$ , לחישוב הסתכלו במבוא המתמטי. מערכת מרכז המסה:

התנע הכולל של מערכת:  $\vec{p}_T = M\vec{v}_{c.m.}$ . ניתן להסתכל על מערכת גופים כגוף נקודתי שמסתו היא סכום המסות ומהירותו היא מהירות מרכז המסה. מערכת מרכז המסה היא מערכת שזזה 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. מומנט התמד

### GOOL

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.

אדטיבות: 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:                          | גוף נקודתי   | גליל חלול |
| $I = mR^2$                                          |              |           |
| טבעת וגליל חלול סביב הציר המרכזי:                   | טבעת (חלולה) |           |
| $I_{c.m.} = mR^2$                                   |              |           |
| 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  $I_x = I_y$  (בדרכי מסמטריה) 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) ו- $dm$  הוא חלקיק של גוף ציר  $z$ :  $r^2 = x^2 + y^2$

### GOOL

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.

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:

$|\vec{L}| = mvd$

כאשר  $d$  הוא המרחק האפקטיבי.

$v$  המהירות. הקשר בין תנ"ז למומנט כוח:

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

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.

פרצסיה (נקיפה): לתנע הזוויתי יש רכיב במישור  $xy$  שמסתובב סביב ציר  $z$ . נגזרת בזמן של הרכיב הזה נותנת לנו את מומנט הכוח שפועל על המערכת.

גוף קשיח

אם גוף קשיח מסתובב סביב ציר סיבוב כל הנקודות 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:  $\vec{L} = \vec{r}_{c.m.} \times \vec{p}_{c.m.}$

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-  $\vec{L}_{c.m.} = I_{c.m.} \vec{\omega}$

אנרגיה קינטית סיבובית:  $E_k = \frac{1}{2} I \omega^2$

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

תנועה משולבת שהסיבוב אינו סביב מרכז מסה (\*):  $E_k = \frac{1}{2} m v_0^2 + \frac{1}{2} I_0 \omega^2 + m \vec{r}_{c.m.,0} \cdot (\vec{v}_0 \times \vec{\omega})$

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            |
|-----------------------------------------|--------------------------|
| $\theta$                                | $x$                      |
| $\omega = \dot{\theta}$                 | $v = \dot{x}$            |
| $\alpha = \dot{\omega} = \ddot{\theta}$ | $a = \dot{v} = \ddot{x}$ |
| $I$                                     | $m$                      |
| $L$                                     | $p$                      |
| $\tau$                                  | $F$                      |

לגול ללא החלקה: מהירות הנקודה שנוגעת במשטח מתאפסת (ביחס למשטח)  $v_{c.m.} = \omega R$ ;  $a_{c.m.} = \alpha R$

בגל"ה החיכוך הוא סטטי ולכן אין איבוד אנרגיה.

### איר נגשים לשאלות?

חוקי שימור: בודקים מה נשמר: 1. אנרגיה אם כל הכוחות משמרים. 2. תנע קווי אם סכום הכוחות החיצוניים מתאפס. 3. תנ"ז אם סכום המומנטים החיצוניים מתאפס.

עושים: 1. חוק  $\Sigma F = ma_{c.m.}$  2. משוואת מומנטים:  $\Sigma \tau = I\alpha$  3. קשר בין התאוצות, לדוגמה  $a_{c.m.} = \alpha R$

תנועה הרמונית פשוטה

משוואת התנועה:  $-k(x - x_0) = m\ddot{x}$

$k$  ו- $m$  הם קבועים חיוביים כלשהם.  $x_0$  - קבוע שיכול להיות חיובי או שלילי.  $x$  - משתנה כלשהו, יכול להיות גם זוויתי או משתנה אחר.  $\ddot{x}$  - נגזרת שניה של המשתנה. חייב להיות מינוס לפני  $k$ .

פתרון המשוואה:  $x(t) = A \cos(\omega t + \varphi) + x_0$

$x_0$  - נקודת שיווי המשקל, הנקודה שבה  $\Sigma \vec{F} = 0$ .  $A$  - אמפליטודה, המרחק המקסימאלי משווי המשקל.  $\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$  - תדירות זוויתית

$\varphi$  - פאזה. מציאת הקבועים בפתרון:  $x_0$  - אפשר למצוא ישירות מהקבוע שבמשוואה או למצוא אותו מסכום הכוחות שווה לאפס.

של המדקד  $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$  של המדקד  $\ddot{x}$

$\varphi$ ,  $A$  מוצאים מתנאי התחלה  $x(0)$  ו- $\dot{x}(0)$ .

נוסחה למהירות המקסימאלית:  $v_{max} = \omega A$

מטוטלת פיזיקאלית: גוף קשיח שתולים בנקודה כלשהי

תלייה:  $\omega = \sqrt{\frac{mgr_{c.m.}}{I_0}}$

$I_0$  - מומנט ההתמד בנקודת התלייה

האנרגיה:  $E = \frac{1}{2} m \dot{x}^2 + \frac{1}{2} k(x - x_0)^2 = \frac{1}{2} m A^2 \omega^2 \sin^2(\omega t + \varphi)$

האנרגיה הכוללת קבועה ואפשר לחשב אותה דרך האמפליטודה.

חילופי האנרגיה בין האנרגיה הקינטית לפוטנציאלית, הפוטנציאלית מקסי בקצוות והקינטית בשיווי משקל. בור פוטנציאלי: 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 מרוסן מהצורה:  $F = -\lambda v$

$v$  - מהירות הגוף ו- $\lambda$  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

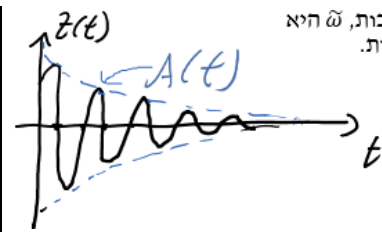
מקרה (II) - ריסון קריטי:  $\frac{\Gamma}{2} = \omega_0$

דעיכה הכי מהירה לשינוי משקל עם תנודה אחת.

מקרה (III) - ריסון חלש:  $\frac{\Gamma}{2} < \omega_0$

$z(t) = Ae^{-\frac{\Gamma}{2}t} \cos(\tilde{\omega}t + \varphi)$ ;  $\tilde{\omega} = \sqrt{\omega_0^2 - \left(\frac{\Gamma}{2}\right)^2}$

יש תנודות דועכות,  $\tilde{\omega}$  היא תדירות התנודות.



## תנועה הרמונית מרוסנת ומאולצת GOOL

בנוסף לכוח הקפיץ והמרסן נוסף כוח מאלץ מהצורה:

$$\vec{F}(t) = F_0 \sin(\Omega t)$$

$\Omega$  ו-  $F_0$  קבועים כלשהם

$$\ddot{z} + \Gamma \dot{z} + \omega_0^2 z = \frac{F_0}{m} \sin(\Omega t)$$

משוואת התנועה:

פתרון משוואת התנועה:

$$x(t) = A(\Omega) \sin(\Omega t + \phi) + x_{\text{הומוגני}}(t)$$

( $t$ ) הומוגני-  $x$  הוא הפתרון של תנועה הרמונית מרוסנת

שמתחלק לשלושת המקרים ...

- במצב עמיד (לאחר זמן רב) נזניח 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

מקסימאלי. ניתן למצוא אותה ע"י נגזרת של  $A$  לפי  $\Omega$ . אם

$\omega_0 \ll \Omega$  אז תדירות התהודה היא בקירוב  $\omega_0$  (תדירות

התנועה ההרמונית ללא כוח מאלץ ומרסן)

## כבידה וכוח מרכזי GOOL

$$\vec{F}(r) = f(r)\hat{r}$$

כוח מרכזי:

- תלוי רק ב  $r$  ובכיוון רדיאלי בלבד.

- כוח משמר (אנרגיה).

- לא מפעיל מומנט כוח ולכן הוא משמר גם תנע זוויתי.

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

כוח הכובד:

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

$$\frac{GMm}{r^2} = \frac{GM_E m}{R_E^2} \approx mg$$

- קרוב לכדה"א

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

$$g = \frac{GM_E}{R_E^2}$$

$$U(r) = -\frac{GMm}{r}$$

האנרגיה הפוטנציאלית של כוח הכובד:

הצורה הזו של האנרגיה היא צורה כללית שיש לכוחות

נוספים והרבה פעמים רומשים אותה כ:

$$U(r) = -\frac{\alpha}{r}$$

כאשר  $\alpha = GMm$  עבור הכובד

$$r(\theta) = \frac{r_0}{1 + \varepsilon \cos \theta}$$

המסלול של גוף תחת כוח הכובד:

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

הכוללת של הגוף ו-  $L$  הוא התנאי.

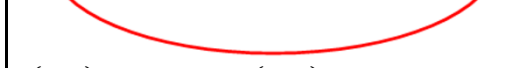
צורת המסלול מתחלקת ל-3 מקרים:

מקרה 1: מעגל  $\varepsilon = 0$ . במקרה הזה ניתן להשוות את

הכוח ל-  $\frac{mv^2}{r}$  ולקבל ש:  $v = \sqrt{\frac{GM}{r}}$

מקרה 2: אליפסה  $0 < \varepsilon < 1$

- מקור הכוח נמצא באחד ממוקדי האליפסה.



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

- בד"כ נמצא המהירויות באמצעות שימור אנרגיה ותנאי.

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

$$a = \frac{r_{\min} + r_{\max}}{2} = \frac{r_0}{1 - \varepsilon^2}; b = \frac{r_0}{\sqrt{1 - \varepsilon^2}}$$

שטח האליפסה:

מקרה 3: היפרבולה  $\varepsilon \geq 1$  (פרבולה כאשר  $\varepsilon = 1$ ):

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

מהירות מילוט -

המהירות הדרושה להגיע

לאינסוף.

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

אנרגיה פוטנציאלית אפסטיבית:

בבעיות שבהן האנרגיה הפוטנציאלית תלויה רק ב  $r$  ניתן לרשום את האנרגיה הכוללת של הגוף כתלות

$$E = \frac{1}{2} m \dot{r}^2 + U_{\text{eff}}(r)$$

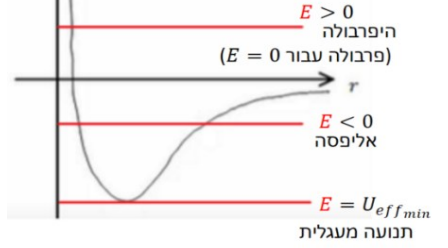
במשנתה בלבד.

$$U_{\text{eff}}(r) = \frac{L^2}{2mr^2} + U(r)$$

כאשר:

$$U(r) = -\frac{\alpha}{r}$$

עבור  $U(r)$  נקבל את הגרף הבא עבור  $U_{\text{eff}}$ :



חוק 1 של קפלר: צורת המסלול של כל כוכב לכת סביב

השמש היא אליפסה, שהשמש נמצאת באחד ממוקדיה.

החוק 2 - חוק השטחים השווים: הקו שמחבר את כוכב

הלכת עם השמש (רדיוס המקום) מכסה שטחים שווים

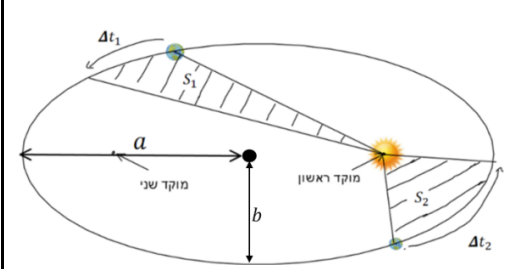
במרחקים שווים. מעבר לכך ניתן להגיד שגם אם הזמנים

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



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

חוק 3 של קפלר:

$M$  - מסת הכוכב שבמוקד

במקרה של מערכת בינארית שבה שני הכוכבים זזים

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

הנוסחה היא:

## וקטורים GOOL

$$A_x = |\vec{A}| \cos \theta$$

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

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

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

כפל בסקלר:

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

תנע ואנרגיה

יחסותיים:

$$\vec{p} = \gamma m \vec{v}; E = \gamma mc^2$$

הגודל  $\gamma$  קשור עכשיו למהירות הגוף ועבורו נרצה לחשב

את התנע ולא למעבר בין מערכות אינרציאליות שונות.

נוסחאות נוספות:

$$E^2 = |\vec{p}|^2 c^2 + m^2 c^4; |\vec{p}| = \sqrt{\gamma^2 - 1} \cdot mc$$

$$E_0 = mc^2$$

אנרגיית מנוחה:

$$E_k = E - E_0 = mc^2(\gamma - 1)$$

אנרגיה קינטית:

עבור חלקיקים מסוימים מסת המנוחה היא אפס (פוטון,

ניוטרינו) והאנרגיה הקינטית היא:

$$E = |\vec{p}|c = h\nu$$

$\nu$  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" (מינוס באנרגיה) זהה בכל מערכות היחס:

$$p_x^2 + p_y^2 + p_z^2 - \left(\frac{E}{c}\right)^2 = \text{const}$$

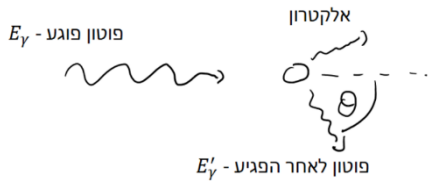
הנוסחה נכונה גם עבור מערכת עם יותר מגוף אחד כאשר

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 נפלץ אלקטרון וכיוון התנועה של הפוטון משתנה.



פוטון לאחר הפגיעה -  $E'_\gamma$

$$\frac{1}{E'_\gamma} - \frac{1}{E_\gamma} = \frac{1}{m_e c^2} (1 - \cos \theta)$$

$E_\gamma$  - אנרגיית הפוטון לפני הפגיעה

$E'_\gamma$  - אנרגיית הפוטון אחרי הפגיעה

$m_e$  - מסת אלקטרון

$\theta$  - זווית התנועה של הפוטון ביחס לכיוון הפגיעה.

$$1 \text{ eV} = 1.60 \times 10^{-19} \text{ J}$$

יחידת האלקטרון וולט:

המרת מסת הגופים לאנרגיה:

$$m_e | \approx 8.19 \times 10^{-14} \text{ J} (\approx 511 \text{ keV})$$

$$m_p | \approx 1.50 \times 10^{-10} \text{ J} (\approx 938 \text{ MeV})$$

$$m_{\text{Uranium}} \approx 3.55 \times 10^{-8} \text{ J} (\approx 225 \text{ GeV})$$

- ניתן גם לרשום את היחידות של התנע של גופים כ-  $\frac{eV}{c}$

כלומר הכמות (המספר) זהה רק ביחידות נחלק ב  $c$ .

## יחסות פרטית GOOL

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

בוואקום. מכאן, מדידת הזמן שונה בין מערכות הייחוס.

- הזמן הופך לקואורדינטה רביעית (ביחד עם:  $x, y, z$ )

שעוברת טרנספורמציה.

$$\gamma_0 = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v_0}{c}\right)^2}}; \beta = \frac{v_0}{c}$$

$\gamma_0$  תמיד גדולה מ 1

טרנספורמצית לורנץ למיקום והזמן:

$$x' = \gamma_0(x - v_0 t); y' = y; z' = z$$

$$t' = \gamma_0\left(t - \frac{v_0 x}{c^2}\right); \beta = \frac{v_0}{c}; \gamma_0 = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v_0}{c}\right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

טרנספורמציה הפוכה:

$$x = \gamma_0(x' + v_0 t'); y' = y; z' = z$$

$$t = \gamma_0\left(t' + \frac{v_0 x'}{c^2}\right)$$

- הצירים של המערכות חייבים להיות מקבילים.

- בזמן  $t = t' = 0$  חייבים שהראשיות מתלכדות.

מערכת העצמית:

מערכת בה המאורע הנצפה נמצא במנוחה.

- זמן עצמי  $\tau$  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)

$$\Delta t = \gamma_0 \tau$$

למערכת נעה

$$\tan \theta = \gamma_0 \tan \theta'$$

שינוי זווית במדידת אורך:

$\theta'$  - זווית ביחס לציר ה  $x$  (ציר התנועה) במערכת העצמית

$\theta$  - זווית ביחס לציר ה  $x$  (ציר התנועה) במערכת אחרת.

אפקט דופלר היחסות:

$$T = \sqrt{\frac{1 + \beta}{1 - \beta}} \tau$$

זמן המחזור של הגל:

$$\lambda = \sqrt{\frac{1 + \beta}{1 - \beta}} \lambda'$$

אורך הגל:

$$f = \sqrt{\frac{1 - \beta}{1 + \beta}} f'$$

תדירות הגל:

$$\lambda', f', \tau$$

הזמן, התדירות ואורך הגל במערכת העצמית

טרנספורמצית לורנץ למהירויות:

$$v'_x = \frac{v_x - v_0}{1 - \frac{v_0 v_x}{c^2}}; v'_y = \frac{v_y}{\gamma_0 \left(1 - \frac{v_0 v_x}{c^2}\right)}; v'_z = \frac{v_z}{\gamma_0 \left(1 - \frac{v_0 v_x}{c^2}\right)}$$

אברציה - שינוי זווית המהירות:

$$\tan \theta' = \frac{\sin \theta}{\gamma_0 \left( \cos \theta - \frac{v_0}{c} \right)}$$

שימו לב שפה השינוי הוא בזווית של וקטור המהירות (כיוון התנועה) ולא שינוי זווית של הגוף כמו למעלה.