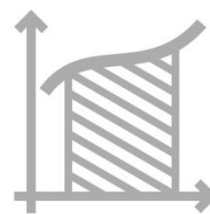


# יסודות הפיזיקה ב (2014)



## תוכן העניינים

1	קבלים	1
16	השדה המגנטי	2
19	הכוח המגנטי (חוק לורנץ)	3
26	חוק פארדיי	4
29	מעגלי זרם חילופין	5
40	אופטיקה	6
56	גלים	7
74	טמפרטורה התפשטות תרמית וחוק הגז האידיאלי	8
79	האטום - התפתחות הסטורית ומודל האטום של בוהר	9
84	האפקט הפוטואלקטרי	10
87	גרעין האטום, אנרגיית הגרעין ורדיואקטיביות	11
93	תורת היחסות	12

# יסודות הפיזיקה ב (20114)

פרק 1 - קבלים

תוכן העניינים

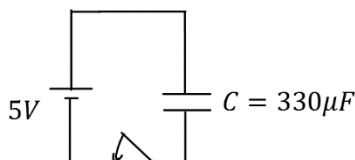
1	.....	1. הרצאות ותרגילים
9	.....	2. תרגילים נוספים

## הרצאות ותרגילים:

### שאלות:

#### (1) קבל ומקור דוגמה בסיסית

קבל בעל קיבול  $C = 330\mu\text{F}$  מחובר לסוללה במתח  $V = 5\text{V}$ . סוגרים את המפסק במעגל ומחכים זמן רב.



א. מה יהיה הזרם במעגל?

ב. מה יהיה המתח בין לוחות הקבל?

ג. מה יהיה המטען על הלוחות? ציין איפה יהיה המטען החיובי ואיפה השלילי.

ד. חזור על הסעיפים במקרה שבו מחובר גם נגד בטור במעגל.

#### (2) מוציאים מטען מהקבל

קבל טעון במטען של  $5\mu\text{C}$ . מד מתח שמחובר לקבל מראה קריאה של 3 וולט.

א. מצא את הקיבול של הקבל.

כעת מוציאים  $2\mu\text{C}$  מהמטען על הקבל (ו-  $2\mu\text{C}$  מהצד השלילי).

ב. מה יראה מד המתח?

#### (3) קבל במקביל לנגד

במעגל הבא סוגרים את המפסק ומחכים זמן רב.

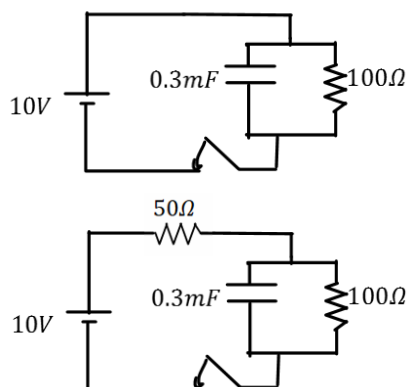
א. מצא את המתח והמטען על הקבל.

ב. האם יזרום זרם במעגל?

אם כן, מצא את גודלו וכיוונו.

ג. חזור על הסעיפים עבור המקרה בו יש

נגד נוסף במערכת (ראה תרשים).



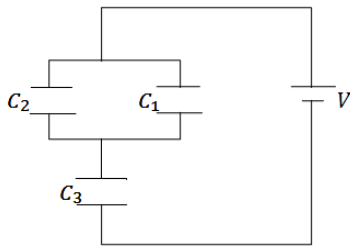
#### (4) חישוב קיבול של קבל לוחות

קבל לוחות מורכב מלוחות זהים בעלי שטח  $2\text{cm}^2$  ומרחק בין הלוחות  $0.3\text{mm}$ .

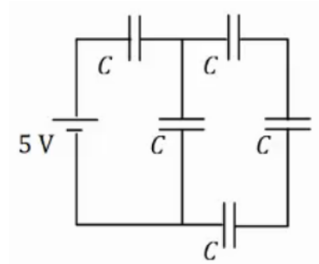
א. חשב את הקיבול של הקבל.

ב. מה יהיה המטען על הקבל אם נחבר אותו למקור מתח  $V = 3\text{V}$

(לאחר זמן רב)?

**(5) חיבור במקביל ובטור**

במעגל הבא נתון מתח הסוללה  $V = 3V$  והקיבול של כל קבל:  $C_1 = 2\mu F$ ,  $C_2 = 3\mu F$ ,  $C_3 = 5\mu F$ . מצא את המטען על כל קבל.

**(6) חיבור 5 קבלים**

במעגל הבא לכל הקבלים קיבול זהה  $C = 200\mu F$ . המתח של הסוללה הוא  $V = 5V$ .  
 א. מצא את הקיבול השקול של המעגל.  
 ב. מצא את המתח והמטען על כל קבל זמן רב לאחר סגירת המעגל.

**(7) מרחיקים לוחות בקבל**

- קבל לוחות מורכב מלוחות זהים בעלי שטח  $3\text{cm}^2$  ומרחק בין הלוחות  $0.4\text{mm}$ .
- חשב את הקיבול של הקבל
  - מה יהיה המטען על הקבל אם נחבר אותו למקור מתח  $V = 3V$  (לאחר זמן רב).
  - כעת מנתקים את הקבל ממקור המתח ומגדלים את המרחק בין הלוחות פי 2.
  - מצא את הקיבול החדש.
  - מצא את המטען והמתח על הקבל החדש.
  - חזור על סעיפים ג' ו-ד', אם היינו מרחיקים את הלוחות מבלי לנתק את מקור המתח.

**(8) אנרגיה של קבל לוחות**

- קבל לוחות מורכב מלוחות זהים בעלי שטח  $5\text{cm}^2$  ומרחק בין הלוחות  $2\text{mm}$ .
- חשב את הקיבול של הקבל.
  - מחברים את הקבל לסוללה במתח 4 וולט.
  - מהי האנרגיה האגורה בקבל לאחר זמן רב?

**(9) מקרבים את הלוחות**

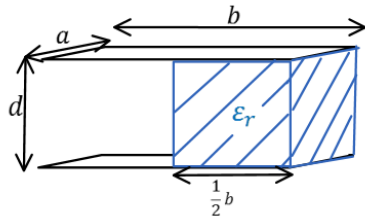
- קבל לוחות מורכב מלוחות זהים בעלי שטח  $6\text{cm}^2$  ומרחק בין הלוחות  $3\text{mm}$ .
- חשב את הקיבול של הקבל.
  - מחברים את הקבל לסוללה במתח  $5$  וולט.
  - מהי האנרגיה האגורה בקבל לאחר זמן רב?
  - מקרבים את הלוחות הקבל למרחק  $1\text{mm}$ .
  - מצא את האנרגיה החדשה אם הקבל מחובר לסוללה במשך כל התהליך. רשום גם את שינוי האנרגיה בקבל.
  - חזור על ג' עבור המקרה שבו מנתקים את הקבל מהסוללה לפני שמקרבים את הלוחות.

**(10) מכניסים חומר לקבל בשתי דרכים**

- קבל בעל קיבול של  $5\mu\text{F}$  מחובר למקור מתח של  $12\text{V}$ .
- חשב את המטען, המתח והאנרגיה האגורה בקבל זמן רב לאחר החיבור למקור. מכניסים לקבל חומר דיאלקטרי בעל מקדם דיאלקטרי  $\epsilon_r = 1.2$  הממלא את כל הרווח בין הלוחות הקבל.
  - בהנחה שהקבל מחובר למקור בכל התהליך. חשב את המתח המטען והאנרגיה בקבל לאחר זמן רב.
  - חשב את השינוי במטען ובאנרגיה בעקבות הכנסת החומר.
  - חזור על סעיף ב' אם מנתקים את הקבל מהמקור לפני שמכניסים את החומר הדיאלקטרי.

**(11) מכניסים ומוציאים חומר מקבל**

- קבל בעל קיבול של  $8\mu\text{F}$  מחובר למקור מתח של  $12\text{V}$ .
- חשב את המטען, המתח והאנרגיה האגורה בקבל זמן רב לאחר החיבור למקור. מכניסים לקבל חומר דיאלקטרי בעל מקדם דיאלקטרי  $\epsilon_r = 1.4$  הממלא את כל הרווח בין הלוחות הקבל.
  - בהנחה שהקבל מחובר למקור בכל התהליך. חשב את המתח המטען והאנרגיה בקבל לאחר זמן רב. כעת מנתקים את הקבל מהמקור ומוציאים את החומר הדיאלקטרי.
  - מה יהיה המתח המטען והאנרגיה בקבל לאחר זמן רב?
  - חשב את שינוי האנרגיה בכל שלב בתהליך.

**12) קבל עם חצי ימין מלא**

קבל לוחות מורכב משני לוחות בעלי שטח  $A = a \times b$ ,

ומרחק  $d$  בין הלוחות.  $a = 3\text{cm}$ ,  $b = 4\text{cm}$ ,  $d = 2\text{mm}$ .

א. מצא את הקיבול של הקבל.

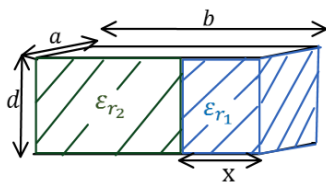
ממלאים את חציו הימני של הקבל בחומר דיאלקטרי

בעל מקדם  $\epsilon_r = 3$  וחציו השמאלי נשאר ריק (ראה איור).

ב. מצא את הקיבול החדש של הקבל.

ג. מחברים את הקבל למקור מתח  $V_0 = 5\text{V}$ .

כמה מטען יהיה על כל לוח ומה תהיה האנרגיה של הקבל?

**13) קבל עם חלק ימין שונה מחלק שמאל**

קבל לוחות מורכב משני לוחות בעלי שטח  $A = a \times b$ ,

ומרחק  $d$  בין הלוחות.  $a = 5\text{cm}$ ,  $b = 6\text{cm}$ ,  $d = 1\text{mm}$ .

ממלאים את חלק של הקבל ברוחב  $x = 1\text{cm}$  בחומר

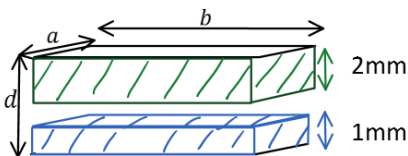
דיאלקטרי בעל מקדם  $\epsilon_{r1} = 4$ , ואת החלק הנותר

בחומר דיאלקטרי בעל מקדם  $\epsilon_{r2} = 2$  (ראה איור).

א. מצא את הקיבול החדש של הקבל.

ב. מחברים את הקבל למקור מתח  $V_0 = 5\text{V}$ .

כמה מטען יהיה על כל לוח ומה תהיה האנרגיה של הקבל?

**14) קבל עם שלושה חלקים אחד מעל השני**

קבל לוחות מורכב משני לוחות בעלי שטח  $A = a \times b$ ,

ומרחק  $d$  בין הלוחות.  $a = 5\text{cm}$ ,  $b = 6\text{cm}$ ,  $d = 4\text{mm}$ .

ממלאים חלק של הקבל בגובה  $1\text{mm}$  ולכל הרוחב

בחומר דיאלקטרי בעל מקדם  $\epsilon_{r1} = 4$ .

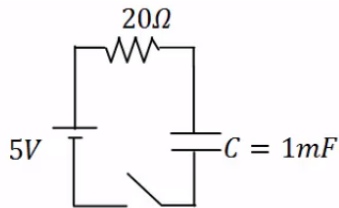
את החלק מגובה  $2\text{mm}$  ועד הלוח העליון ממלאים בחומר דיאלקטרי בעל

מקדם  $\epsilon_{r2} = 2$  (ראה איור).

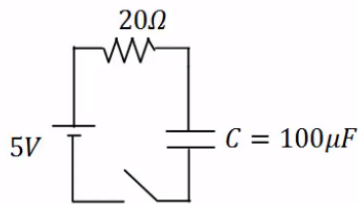
א. מצא את הקיבול החדש של הקבל.

ב. מחברים את הקבל למקור מתח  $V_0 = 5\text{V}$ .

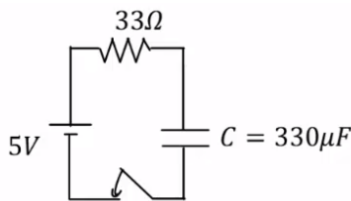
כמה מטען יהיה על כל לוח ומה תהיה האנרגיה של הקבל?

**(15) טעינה**

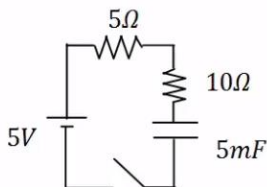
- במעגל הבא הקיבול של הקבל הוא:  $C = 1\text{mF}$ ,  
 התנגדות הנגד היא:  $R = 20\Omega$  ומתח המקור  
 הוא:  $V_0 = 5\text{V}$ . סוגרים את המפסק ב- $t = 0$ .  
 א. מהו המטען על הקבל לאחר 0.01 שניות?  
 ב. המתח על הקבל באותו הרגע?  
 ג. מהם המטען והמתח על הקבל לאחר 0.1 שניות?

**(16) זמן אופייני**

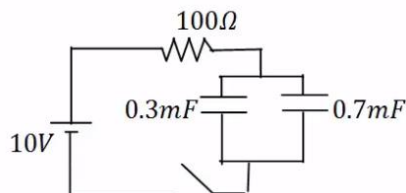
- במעגל הבא הקיבול של הקבל הוא:  $C = 100\mu\text{F}$ ,  
 התנגדות הנגד היא:  $R = 100\Omega$  ומתח המקור  
 הוא:  $V_0 = 5\text{V}$ . סוגרים את המפסק ב- $t = 0$ .  
 מהו המטען והמתח על הקבל לאחר 0.3 שניות?

**(17) חישוב זרם**

- במעגל הבא הקיבול של הקבל הוא:  $C = 330\mu\text{F}$ ,  
 התנגדות הנגד היא:  $R = 33\Omega$  ומתח המקור  
 הוא:  $V_0 = 5\text{V}$ . סוגרים את המפסק ב- $t = 0$ .  
 א. מהו הזרם במעגל ב- $t = 0.005\text{sec}$ ?  
 ב. מהו ההספק בנגד באותו הרגע?

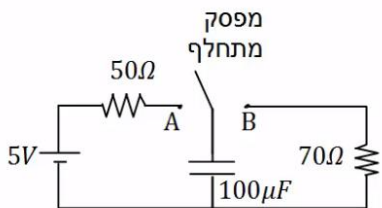
**(18) שני נגדים**

- במעגל הבא סוגרים את המפסק ב- $t = 0$ .  
 א. מהו הזמן האופייני במעגל?  
 ב. מצא את המתח והזרם בקבל בזמנים:  $t = 0.01, 0.6\text{sec}$ .

**(19) שני קבלים**

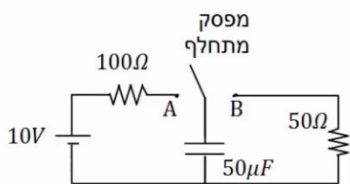
- במעגל הבא סוגרים את המפסק ב- $t = 0$ .  
 א. מהו הזמן האופייני במעגל?  
 ב. מצא את המתח והמטען בכל קבל  
 בזמנים:  $t = 0.2, 0.8\text{sec}$ .

**20) דוגמה מסכמת**



במעגל הבא מחברים את המפסק המתחלף לנקודה A ומחכים זמן רב.  
א. רשום את המתח על הקבל כתלות בזמן. מהו "זמן רב"?  
לאחר מכן מעבירים את המפסק לנקודה B.  
ב. רשום שוב את המתח על הקבל כתלות בזמן.

**21) מתג מתחלף**

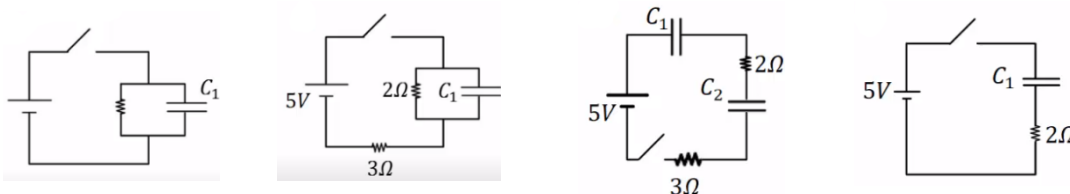


במעגל הבא מחברים ב- $t = 0$  את המפסק המתחלף לנקודה A.  
ב- $t = 0.01$  מעבירים את המפסק לנקודה B.  
א. רשום את המתח על הקבל כתלות בזמן.  
ב. מה המטען על הקבל ב- $t = 0.02$ ?  
ג. רשום את הזרם כתלות בזמן.  
ד. צייר גרפים עבור המתח והזרם כתלות בזמן.

**22) מציאת זרם במספר מעגלים**

מצא את הזרם, בכל נגד, במעגלים הבאים. ברגע סגירת המתג הנח שהקבלים אינם טעונים לפני הסגירה של המתג וכי הסוללה והחוטמים אידיאליים.

א. ב. ג. ד.



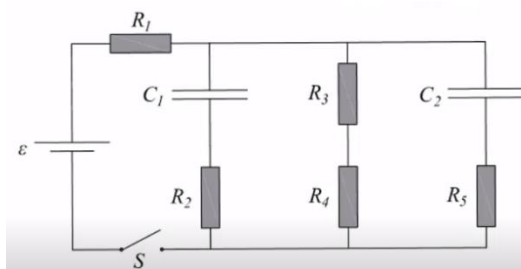
**23) קבלים במעגל בהתחלה ולאחר זמן רב**

נתוני הרכיבים במעגל הבא הם:

$$R_1 = 4\Omega, R_2 = 3\Omega, R_3 = 2\Omega, R_4 = 1\Omega, R_5 = 6\Omega, \varepsilon = 24V, C_1 = 2\mu F, C_2 = 4\mu F$$

לפני סגירת המפסק הקבלים אינם טעונים.

- א. מהו הזרם דרך כל אחד מהנגדים במעגל ברגע סגירת המפסק?
- ב. מהו הזרם דרך כל אחד מהנגדים במעגל זמן רב לאחר סגירת המפסק?
- ג. מהו המטען על כל אחד מהקבלים זמן רב לאחר סגירת המפסק?



## תשובות סופיות:

- א.  $I = 0$       ב.  $|V_c| = 5V$       ג.  $1.65mc$       ד. ללא שינוי.      (1)
- א.  $1.67\mu F$       ב.  $1.8V$       (2)
- א.  $V_c = V_0 = 10V, Q = 3mc$       ב.  $I = 0.1A$       (3)
- א.  $I = 0.067A, V_c = 6.7, Q = 2.01mc$       ב.  $Q = 17.7pC$       א.  $C \approx 5.9 \cdot 10^{-12}F$       (4)
- א.  $q_1 = 3\mu C, q_2 = 4.5\mu C, q_3 = 7.5\mu C$       (5)
- א.  $C_{T_1} = \frac{C}{3}, C_{T_2} = \frac{4C}{3}, C_T = 114\mu F$       ב.  $q_1 = q_T = 571\mu C, q_2 = q_3 = q_4 = q_{T_1} = 143\mu C$       (6)
- א.  $V_1 = 2.86V, V_5 = 2.14V, V_2 = V_3 = V_4 = 0.715V$       (7)
- א.  $C = 6.64pF$       ב.  $Q = 19.9pc$       ג.  $C' = 3.32pF, V' = 6V, Q' = 19.9pc$       ה.  $C' = 3.32pF$       (ג)      ד.  $V' = 3V, Q' = 9.96pc$       (8)
- א.  $C = 2.21pF$       ב.  $U_c = 17.68 \cdot 10^{-12}J$       (8)
- א.  $C = 1.77pF$       ב.  $U_c = 22.13pJ$       ג.  $\Delta U = 44.245pJ, U'_c = 66.375$       ד.  $U'_c \approx 7.38pJ, \Delta U = -14.76pJ$       (9)
- א.  $U_c = 3.6 \cdot 10^{-4}J, Q = 60\mu C, V_c = 12V$       ב.  $Q' = 72\mu C, U'_c = 432\mu J, C' = 6\mu F$       ג.  $\Delta U = 72\mu J, \Delta Q = 12\mu C$       ד.  $V' = 10V, U_c = 300\mu J$       (10)
- א.  $U_c = 576\mu J, Q = 96\mu F, V_c = 12V$       ב.  $U'_c = 806.4\mu J, Q' = 134.4\mu F, V'_c = 12V$       ג.  $U'_c \approx 1129\mu J, Q'' = 134.4\mu F, V''_c = 16.8V$       ד. במעבר מסעיף א' ל-ב':  $\Delta U = 230.4\mu J$ , במעבר מסעיף ב' ל-ג':  $\Delta U \approx 323\mu J$       (11)
- א.  $C = 5.31pF$       ב.  $C_T = 10.62pF$       ג.  $U_c = 132.75pJ$       (12)
- א.  $C_T = 61.95pF$       ב.  $U_c = 1548.75pJ, Q = 309.75pc$       (13)
- א.  $C_T = 11.8pF$       ב.  $U_c = 1.475 \cdot 10^{-7}J, q = 59 \cdot 10^{-9}c$       (14)
- א.  $q_c(t) \approx 1.97 \cdot 10^{-3}C$       ב.  $V_c = 1.97V$       (15)
- א.  $V_c = 4.97V$       ג.  $q_c(t = 0.1) = 4.97 \cdot 10^{-3}C$       (16)
- א.  $V_c = V_0 = 5V$       ב.  $q_c = 5 \cdot 10^{-4}C$       (16)
- א.  $I(0.005) \approx 0.096A$       ב.  $P \approx 0.305W$       (17)
- א.  $\tau = 0.075sec$       (18)
- א.  $I(t = \infty) = 0, V_c(t = \infty) = 5V, I(t = 0.01) \approx 0.292A, V_c(t = 0.01) = 0.624V$       ב.      (19)
- א.  $\tau = 0.1sec$       (19)
- א.  $q_2(t = 0.2) = 6.01 \cdot 10^{-3}C, q_1(t = 0.2) = 2.60 \cdot 10^{-3}C, V_T(t = 0.2) = 8.65V$       ב.      (19)

$$V_C(t) = 5 \cdot e^{-\frac{t}{7 \cdot 10^{-3}}} \quad \text{ב.}$$

$$V_C(t) = 5V \left( 1 - e^{-\frac{t}{5 \cdot 10^{-3}}} \right) \quad \text{א. (20)}$$

$$q_C(t=0.02) \approx 7.92 \cdot 10^{-6} \text{C} \quad \text{ב.} \quad V_C(t) = \begin{cases} 10 \left( 1 - e^{-\frac{t}{0.005}} \right) & 0 < t < 0.01 \\ 8.65 \cdot e^{-\frac{t-0.01}{0.0025}} & 0.01 < t \end{cases} \quad \text{א. (21)}$$

$$\text{ד. ראה סרטון.} \quad I(t) = \begin{cases} \frac{10}{100} \cdot e^{-\frac{t}{0.005}} & 0 < t < 0.01 \\ \frac{8.65}{50} \cdot e^{-\frac{t-0.01}{0.0025}} & 0.1 < t \end{cases} \quad \text{ג.}$$

$$I(t=0) = \infty \quad \text{ד.} \quad I = \frac{5}{3} \text{A} \quad \text{ג.} \quad I = 1\text{A} \quad \text{ב.} \quad I(t=0) = 2.5\text{A} \quad \text{א. (22)}$$

$$I_T = I_1 \approx 4.62\text{A}, I_2 \approx 1.85\text{A}, I_{3,4} = 1.85\text{A}, I_5 \approx 0.92\text{A} \quad \text{א. (23)}$$

$$q_1 \approx 20.58 \cdot 10^{-6} \text{C}, q_2 \approx 41.16 \cdot 10^{-6} \text{C} \quad \text{ג.}$$

$$I_{1,3,4} = 3.43\text{A}, I_{2,5} = 0 \quad \text{ב.}$$

## תרגילים נוספים:

### שאלות:

#### תרגילים ברמה א':

#### (1) תרגיל 1 - מציאת מטען

מה המטען המצטבר על קבל של  $C = 30\mu\text{F}$  לאחר זמן רב, אם נחבר אותו למתח של  $10\text{V}$ ?

#### (2) תרגיל 2 - קבל לוחות

קבל לוחות מורכב משני לוחות בעלי שטח  $A = 4\text{cm}^2$ , שביניהם מרחק של  $d = 1\text{mm}$ .

א. מה הקיבול של הקבל אם המרווח בין הלוחות ריק?

ב. מה הקיבול של הקבל אם המרווח בין הלוחות מלא בחומר דיאלקטרי אחיד בעל מקדם  $\epsilon_r = 2.5$ ?

ג. מצא את המטען על הקבל, עבור כל אחד מהמקרים בסעיפים הקודמים, אם מחברים את הקבל למקור מתח של  $5\text{V}$ .

#### (3) תרגיל 3 - חיבור קבלים

מצא את הקיבול השקול של החיבור הבא.



#### (4) תרגיל 4 - חיבור קבלים

מה המטען והמתח על כל קבל במערכת הבאה (זמן רב לאחר חיבור הסוללה)? ציין איפה המטען החיובי והיכן המטען השלילי בכל קבל.



#### (5) תרגיל 5 - חיבור קבלים

נתונה מערכת הקבלים הבאה:

א. מצא את הקיבול השקול בין שני הקצוות של החוט.  
 ב. מצא את המתח והמטען על כל קבל אם מחברים את הקצוות למקור מתח של  $10\text{V}$ .





6 תרגיל 6 - יהלום

נתונה מערכת הקבלים הבאה :

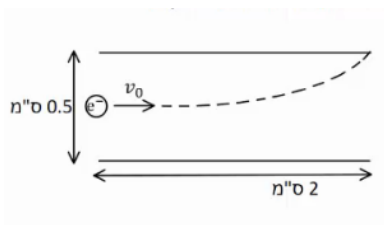
- א. מצא את הקיבול השקול במקרה הבא.
- ב. מצא את המתח והמטען על כל קבל אם מחברים את הקצוות למקור מתח של 10V.



7 תרגיל 7 - חיבור קבלים ומציאת מתח

במעגל הבא נתון הקיבול של כל קבל ומתח הסוללה :

- א. מצא את המתח על כל קבל והמטען על כל קבל. סמן על כל קבל היכן המטען החיובי.
- ב. מהו  $V_{AB}$  המתח בין הנקודות A ל-B?



8 תרגיל 8 - אלקטרון נכנס לקבל לוחות

קבל לוחות מורכב משני לוחות ריבועיים בעלי אורך צלע של 2 ס"מ ומרחק בין הלוחות של 0.5 ס"מ. אלקטרון נכנס במרכז הלוחות עם מהירות, המקבילה

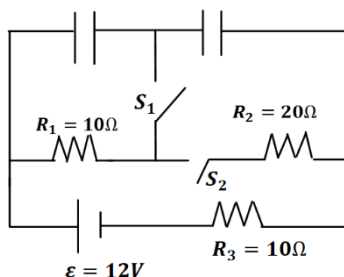
ללוחות, שגודלה  $v_0 = 10^7 \frac{m}{sec}$  (ראה איור).

האלקטרון פוגע בדיוק בקצה הלוח העליון.

א. חשב את השדה בין הלוחות (גודל וכיוון).

ב. חשב את המתח אליו מחובר הקבל.

תרגילים ברמה ב':



9 תרגיל 1 - מעגלים חשמליים

ענה על הסעיפים הבאים עבור המעגל שבציור, זמן רב לאחר סגירת או פתיחת המתגים.

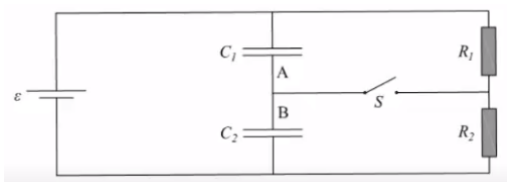
- א. מהו המתח והמטען על כל קבל, כאשר שני המפסקים פתוחים?
- ב. סוגרים את  $S_1$ .  $S_2$  פתוח. מהו המתח והמטען של כל קבל?
- ג. סוגרים את  $S_2$  ופותחים את  $S_1$ . מהו המתח על כל קבל?
- ד. הפעם שניהם סגורים. מהו המתח והמטען על כל קבל?

**10) תרגיל 2 - מעגלים חשמליים**

שני קבלים, האחד של  $10\mu\text{F}$  והשני של  $15\mu\text{F}$ , חוברו בנפרד למקורות מתח של  $6\text{V}$  ו- $8\text{V}$ , בהתאמה. לאחר מכן נותקו ממקורות המתח וחוברו זה לזה. א. מה יהיה המתח והמטען הסופי על כל קבל, אם הקבלים חוברו כאשר הדקים שווי סימן מחוברים זה לזה? ב. ללא קשר לסעיף א', מה יהיה המתח והמטען הסופי על כל קבל, אם הקבלים חוברו כאשר הדקים שונים מחוברים זה לזה.

**11) תרגיל 3 - מעגלים חשמליים**

נתון המעגל החשמלי המופיע בתרשים. ההתנגדויות הפנימיות של מקורות המתח זניחות. כאשר המפסק S פתוח והמעגל במצבו היציב: א. מהו הזרם החשמלי העובר דרך כל אחד מהנגדים? ב. מהו המטען על לוחות הקבל? ג. מהו גודל המתח בין הדקי המפסק הפתוח? סוגרים את המפסק S ומחכים להתייצבות המערכת. ד. מהו הזרם החשמלי העובר דרך כל אחד מהנגדים? ה. מהו המטען על לוחות הקבל?

**12) תרגיל 4 - מעגלים חשמליים**

נתונים שני קבלי לוחות  $C_1$  ו- $C_2$ , ששטח כל לוח הוא  $0.02\text{m}^2$ . המרחק בין לוחות קבל  $C_1$  הוא  $1\text{mm}$  והמרחק בין לוחות קבל  $C_2$  הוא  $3\text{mm}$ .

א. חשבו את הקיבול של כל אחד מהקבלים. חיברו את שני הקבלים למעגל הנתון בשרטוט. נתון:  $\varepsilon = 12\text{V}$ ,  $R_2 = 10\Omega$ ,  $R_1 = 5\Omega$ . פתור את כל הסעיפים לאחר זמן רב. ב. מהו הזרם דרך כל אחד מהנגדים כאשר המספר S פתוח? ג. כאשר המפסק S סגור, מהו הזרם דרך כל אחד מהנגדים? ד. מהו סכום המטען שהצטבר על שני הלוחות A ו-B?

**13) תרגיל 5 - מעגלים חשמליים (עם מקור לא אידיאלי)**


נתון המעגל החשמלי שבאיור, לכל מקור יש התנגדות פנימית המצוינת מתחת לסימון המקור. כאשר המפסק סגור.

- מהם הזרמים (גודל וכיוון) שעוברים בנגדים?
- מהו המתח בין הנקודות  $a$  ו- $b$ ?
- כעת פותחים את המפסק ומחכים זמן רב. מהם הזרמים (גודל וכיוון) שעוברים בנגדים?
- מהו המטען על לוחות הקבל, וכמה אנרגיה אגורה בו?


**14) תרגיל 6 - שני קבלים טעונים מחוברים לקבל שלישי**

במעגל הבא קיבול הקבלים הוא:  $C_1 = 3\mu\text{F}$ ,  $C_2 = 2\mu\text{F}$ , והמתח בסוללה הוא 5V. לאחר שהקבלים נטענים מנתקים את המקור ומחליפים אותו בקבל של  $C_3 = 5\mu\text{F}$ . מצא את המטען המתח והאנרגיה של הקבל החדש, לאחר שהמערכת מתייצבת.

**15) תרגיל 7 - מרחיקים לוחות בקבל לוחות**

- קבל לוחות בעל אורך צלע  $a = 2\text{cm}$  ומרחק בין הלוחות  $d = 1\text{mm}$ , נטען ע"י סוללה במתח 3V. אחרי שהקבל נטען במלואו מנתקים את הסוללה ומרחיקים את הלוחות למרחק  $3d$ .
- מצא את הפרש הפוטנציאל החדש על הקבל.
  - מצא את האנרגיה ההתחלתית והסופית האגורה בקבל.
  - מצא את העבודה הנדרשת ע"מ להרחיק את הלוחות ע"י הגדרת העבודה.


**16) תרגיל 8 - חיבור קונפיגורציית קבלים**

נתונה מערכת קבלים המחוברים על פי השרטוט. מצא את הקיבול השקול של המערכת.



**17) תרגיל 9 - קבלים עם מפסק**

במעגל הבא מחזיקים את הקצה העליון בפוטנציאל קבוע, ונתון  $V_0$  הקצה התחתון מוארק.  
נתון: הקיבול של כל קבל, ההתנגדות הזוהה של הנגדים.  
א. מצא את המתח (הפרש הפוטנציאלים) בין הנקודה A לנקודה B.  
ב. סוגרים את המפסק AB. כמה מטען עבר דרך המפסק עד שהמערכת התייצבה?

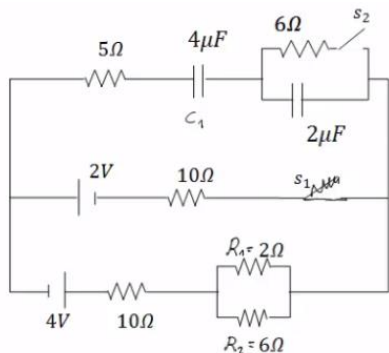
**18) תרגיל 10 - קבל עם פיסת מתכת**

קבל לוחות מחובר למקור מתח  $V$ . שטח כל לוח בקבל הוא  $A$ , והמרחק בין הלוחות הוא  $d$  ( $d \ll \sqrt{A}$ ).



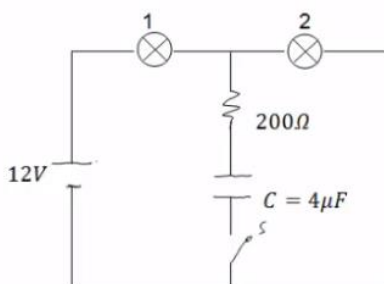
א. מצא את המטען על הקבל, את השדה בתוך הקבל ואת האנרגיה של המערכת.  
ב. כעת מכניסים לקבל פיסת מתכת בעובי  $\frac{d}{4}$  עם שטח  $A$  ממרכז הקבל. חזור על סעיף א.  
ג. כעת מוציאים את המתכת, מחכים שהקבל יטען שוב ומנתקים את מקור המתח. לאחר הניתוק מכניסים את המתכת חזרה פעם שניה. חזור על סעיף א' (סעיף ב' אינו משפיע על סעיף ג').

**19) תרגיל 11**



חשב את כל הזרמים במעגל ואת המטען על כל קבל במצב היציב כאשר המפסקים במצב הבא:  
א.  $S_1$  פתוח ו- $S_2$  סגור.  
ב.  $S_2$  פתוח ו- $S_1$  סגור.  
ג. שני המפסקים סגורים.

**20) תרגיל 12 - שתי נורות**



במעגל הבא הספק נורה מס' 1 במתח של 10V הוא 0.5W. ההספק של נורה מס' 2 באותו המתח הוא 0.4W. התנגדות הנגד היא 200Ω.  
א. חשב את התנגדות המתח וההספק החשמלי של כל נורה כאשר המפסק פתוח.  
ב. חשב את המתח על הקבל אם המפסק סגור והמערכת התייצבה.

## תשובות סופיות:

$$Q = 0.3\text{mF} \quad (1)$$

$$Q_A = 17.7\text{pc}, Q_B = 44.25\text{pc} \quad \text{ג.} \quad C' = 8.85\text{pF} \quad \text{ב.} \quad C = 3.54\text{pF} \quad \text{א.} \quad (2)$$

$$C_T = 260\text{pF} \quad (3)$$

$$Q_1 = Q_2 = 200\text{pc}, V_{C_1} = 1.67\text{V}, V_{C_2} = 3.33\text{V} \quad (4)$$

$$C_T = 2.4\mu\text{F} \quad \text{א.} \quad (5)$$

$$V_{4,5} = 6\text{V}, V_{1,2,3} = 4\text{V}, Q_1 = 4\mu\text{C}, Q_2 = 12\mu\text{C}, Q_3 = 8\mu\text{C}, Q_4 = 6\mu\text{C}, Q_5 = 18\mu\text{C} \quad \text{ב.}$$

$$V_T = 10\text{V}, Q_1 = 20\mu\text{C}, Q_2 = 30\mu\text{C}, Q_3 = 40\mu\text{C} \quad \text{ב.} \quad C_T = 9\mu\text{F} \quad \text{א.} \quad (6)$$

$$Q_{1,2} = 10.29\mu\text{C}, Q_{3,4} = 16\mu\text{C}, V_1 = 10.29\text{V}, V_2 = 1.71\text{V}, V_3 = 8\text{V}, V_4 = 4\text{V} \quad \text{א.} \quad (7)$$

$$V_{AB} = -2.28\text{V} \quad \text{ב.}$$

$$V \approx 35.5\text{V} \quad \text{ב.} \quad \vec{E} \approx -7.12 \cdot 10^3 \frac{\text{N}}{\text{C}} \hat{y} \quad \text{א.} \quad (8)$$

$$V_{C_2} = 0, V_{C_1} = 12\text{V}, Q_1 = 36\mu\text{C} \quad \text{ב.} \quad Q_1 = Q_2 = 24\mu\text{C}, V_1 = 8\text{V}, V_2 = 4\text{V} \quad \text{א.} \quad (9)$$

$$Q_{1,2} = 18\mu\text{C}, V_1 = 6\text{V}, V_2 = 3\text{V} \quad \text{ג.}$$

$$V_{C_1} = 6\text{V}, Q_{C_1} = 18\mu\text{C}, V_{C_2} = 3\text{V}, Q_2 = 18\mu\text{C} \quad \text{ד.}$$

$$q_2 = 36\mu\text{C}, q_1 = 24\mu\text{C}, V_1 = V_2 = 2.4\text{V} \quad \text{ב.} \quad q_2 = 108\mu\text{C}, q_1 = 72\mu\text{C}, V_1 = V_2 = 10.8\text{V} \quad \text{א.} \quad (10)$$

$$|V_s| = 15\text{V} \quad \text{ג.} \quad q_c = 240\mu\text{C} \quad \text{ב.} \quad I = 3\text{A} \quad \text{א.} \quad (11)$$

$$q = 40.4\mu\text{C} \quad \text{ה.} \quad I_1 = 2.52\text{A}, I_2 = -3.87\text{A}, I_3 = 6.39\text{A} \quad \text{ד.}$$

$$I = 0.8\text{A} \quad \text{ג.} \quad I = 0.8\text{A} \quad \text{ב.} \quad C_1 = 1.77 \cdot 10^{-10}\text{F}, C_2 = 0.59 \cdot 10^{-10}\text{F} \quad \text{א.} \quad (12)$$

$$q_1 = 7.08 \cdot 10^{-10}\text{C}, q_2 = 4.72 \cdot 10^{-10}\text{C} \quad \text{ד.}$$

$$V_{ab} = 2.756\text{V} \quad \text{ב.} \quad I_1 = 0.689\text{A}, I_2 = 0.393\text{A} \quad \text{א.} \quad (13)$$

$$q = 1.26 \cdot 10^{-4}\text{C} \quad \text{ד.} \quad I_1 = 0, I = 0.6\text{A} \quad \text{מטה,} \quad \text{ג.}$$

$$q'_3 = 12.5\mu\text{C}, V'_3 = 2.5\text{V}, U = 15.625\text{J} \quad (14)$$

$$U_{c_1} = 15.93 \cdot 10^{-12}\text{J}, U_{c_f} = 47.79 \cdot 10^{-12}\text{J} \quad \text{ב.} \quad V' = 9\text{V} \quad \text{א.} \quad (15)$$

$$|W| = 31.86 \cdot 10^{-12}\text{J} \quad \text{ג.}$$

$$C_T = C_1 + C_6 + C_{2,3,4,5} \quad (16)$$

$$q_1 = \frac{C_1 V_0}{2}, q_2 = \frac{C_2 V_0}{2}, \Delta q = \frac{V_0}{2} (C_2 - C_1) \quad \text{ב.} \quad V_{AB} = \frac{V_0}{2} - \frac{V_0 C_2}{C_1 + C_2} \quad \text{א.} \quad (17)$$

$$q = CV = \frac{\epsilon_0 A}{d} V, E = \frac{V}{d}, U = \frac{1}{2} \frac{\epsilon_0 A}{d} V^2 \quad \text{א. (18)}$$

$$q_1 = q_2 = \frac{4\epsilon_0 AV}{3d}, E_1 = E_2 = \frac{4V}{3d}, U = \frac{1}{2} C_T V^2 = \frac{2\epsilon_0 A}{3d} V^2 \quad \text{ב.}$$

$$E_1 = E_2 = \frac{V}{d}, U = \frac{3\epsilon_0 AV^2}{8d} \quad \text{ג.}$$

$$\frac{136}{129} \mu\text{C} \quad \text{ג.}$$

$$\frac{12}{43} \text{A} \quad \text{ב.}$$

$$16 \mu\text{F} \quad \text{א. (19)}$$

$$R_1 = 200 \Omega, R_2 = 250 \Omega, V_1 = 5.34 \text{V}, V_2 = 6.68 \text{V}, P_1 = 0.143 \text{W}, P_2 = 0.178 \text{W} \quad \text{א. (20)}$$

$$V_C = 6.68 \text{V} \quad \text{ב.}$$

# יסודות הפיזיקה ב (20114)

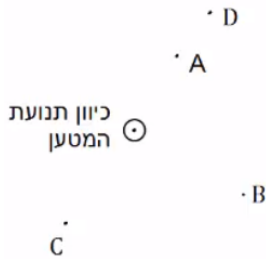
פרק 2 - השדה המגנטי

תוכן העניינים

- 16 ..... 1. הסברים ודוגמאות
- 18 ..... 2. סיכום ותרגילים נוספים

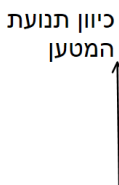
**הסברים ודוגמאות:**

**שאלות:**



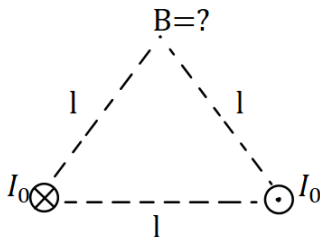
**1 דוגמה 1**

מטען נע מהדף אלינו.  
צייר את כיוון השדה המגנטי בנקודות: A, B, C, D.



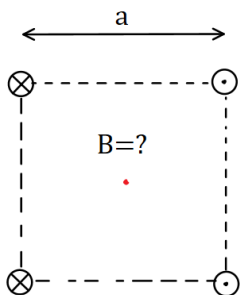
**2 דוגמה 2**

מטען נע במישור הדף כלפי מעלה.  
מה כיוון השדה המגנטי שיוצר המטען משני הצדדים של הקו עליו נע המטען?



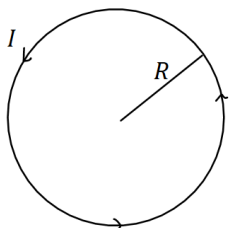
**3 דוגמה 3 - שדה בפינת משולש**

במערכת הבאה ישנם שני תיילים אינסופיים הנושאים זרם  $I_0 = 2A$ .  
התיילים מונחים בקודקודי הבסיס של משולש שווה צלעות בעל אורך צלע  $l = 20_{c.m}$ .  
התיילים מונחים במקביל כך שבאחד הזרם נכנס לתוך הדף ובשני יוצא מן הדף.  
חשב את השדה המגנטי בקודקוד השלישי של המשולש (גודל וכיוון).



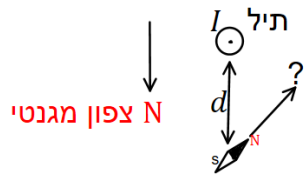
**4 דוגמה 4 - שדה במרכז ריבוע**

במערכת הבאה ישנם ארבעה תיילים אינסופיים בפינותיו של ריבוע בעל אורך צלע  $a = 10_{c.m}$ .  
גודל הזרם בכל התיילים זהה ושווה ל- $3A$ .  
כיוון הזרם מתואר באיור.  
מהו השדה המגנטי במרכז הריבוע?



**5 דוגמה 5 - שדה במרכז טבעת**

מצא את גודל וכיוון השדה המגנטי במרכז הטבעת שבאיור.  
רדיוס הטבעת הוא  $R = 5c.m$  והזרם בה הוא  $I = 0.2A$ .  
בכיוון השעון.



**6) דוגמה 6 - שדה של תיל וכדה"א**

תיל ארוך מונח במאונך לפני כדור הארץ

ונושא זרם  $I = 5A$  במרחק  $d = 5c. m$ .

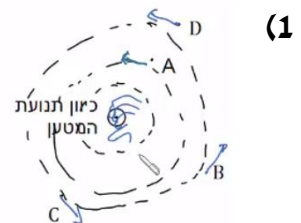
מהתיל לכיוון הצפון המגנטי של כדור הארץ נמצא מצפן,

המוחזק אופקית לכדור הארץ.

מצא את הכיוון אליו תצביע המחט.

(רכיב השדה המגנטי המקביל לפני כדה"א הוא :  $B_t = 2.9 \cdot 10^{-5} T$ ).

**תשובות סופיות:**



(2) מצד ימין השדה נכנס, מצד שמאל השדה יוצא.

(3)  $\vec{B} = -2 \cdot 10^{-6} \hat{y}$

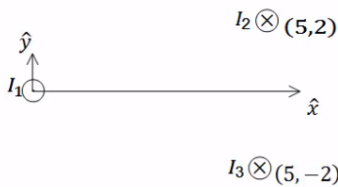
(4)  $\vec{B} = -24.24 \cdot 10^{-6} T \hat{y}$

(5)  $B = 8\pi \cdot 10^{-7} T$

(6)  $\theta \approx 55.4^\circ$

## סיכום ותרגילים נוספים:

### שאלות:



#### (1) שדה של שלושה תילים אינסופיים

שלושה תילים אינסופיים המקבילים לציר ה- $z$

מונחים במיקומים הבאים:  $\vec{r}_1(0,0)$ ,  $\vec{r}_2(5,2)$ ,  $\vec{r}_3(5,-2)$

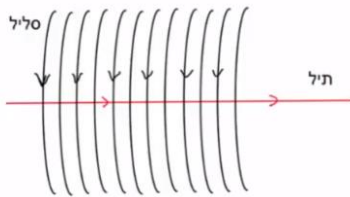
הזרמים בתילים הם:  $I_1 = 3A$  החוצה מהדף,  $I_2 = 5A$

לתוך הדף,  $I_3 = 4A$  גם כן לתוך הדף.

מצא באיזה נקודה לאורך ציר ה- $x$  מתאפס

הרכיב של השדה המגנטי בכיוון  $y$ ?

#### (2) תיל בתוך סליל



סליל ארוך מאוד מונח כך שהציר המרכזי שלו

לאורך ציר  $z$ . צפיפות הליפופים בסליל היא 15

ליפופים לס"מ והזרם בו הוא 2.5mA.

מניחים תיל ארוך מאוד בתוך הסליל ולאורך

הציר המרכזי. הזרם בתיל הוא 0.8A.

כיווני הזרמים מתוארים בתרשים.

א. מהו המרחק הרדיאלי מהציר בו השדה המגנטי שנוצר יהיה בזווית 30

מעלות עם ציר ה- $z$ ?

ב. מהו גודלו של השדה בנקודה זו?

### תשובות סופיות:

(1)  $x_1 = -2.76$ ,  $x_2 = 5.26$

(2) א.  $r = 5.9\text{cm}$ . ב.  $B_T \approx 5.4 \cdot 10^{-6}\text{T}$

# יסודות הפיזיקה ב (20114)

פרק 3 - הכוח המגנטי (חוק לורנץ)

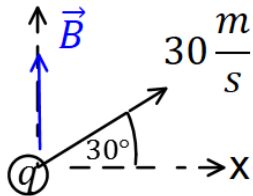
תוכן העניינים

1. הכוח על מטען בודד ותנועה בשדה ..... 19
2. יישומים של הכוח המגנטי ..... (ללא ספר)
3. כוח על תיל נושא זרם ובין תילים ..... 21
4. סיכום ..... (ללא ספר)
5. תרגילים נוספים ..... 23

## הכוח על מטען בודד ותנועה בשדה:

שאלות:

**(1) דוגמה 1**



מטען  $q = 2c$  נע במהירות  $v = 30 \frac{m}{sec}$  בכיוון 30 מעלות ביחס לציר ה- $x$  החיובי.

במרחב ישנו שדה מגנטי אחיד  $\vec{B} = 4T \hat{y}$ . מצא את גודל הכוח המגנטי שפועל על המטען.

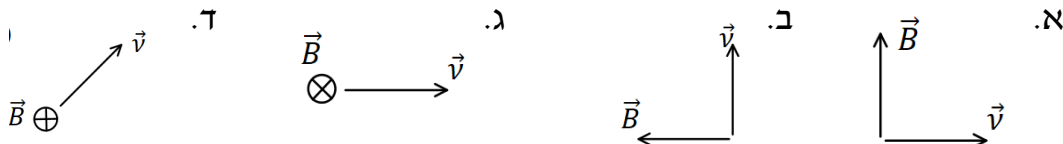
**(2) דוגמה 2**

מטען  $q = 3c$  נע במהירות  $\vec{v} = 2 \frac{m}{sec} \hat{x} + 4 \frac{m}{sec} \hat{y}$

במרחב ישנו שדה מגנטי אחיד  $\vec{B} = 5T \hat{y}$ . מצא את גודל הכוח המגנטי שפועל על המטען.

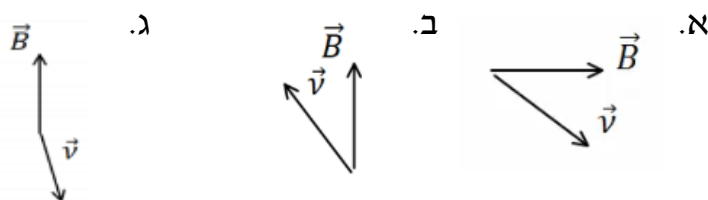
**(3) דוגמה 3**

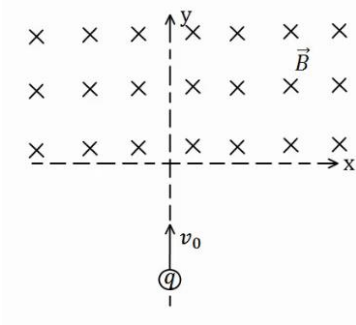
מצא את כיוון הכוח המגנטי במקרים הבאים:



**(4) דוגמה 4**

מצא את כיוון הכוח המגנטי במקרים הבאים:





**5 דוגמה 5**

מטען  $q = 4c$  נע מ- $y = -\infty$  לאורך הכיוון החיובי של ציר ה- $y$ . בכל התחום  $y > 0$  קיים שדה מגנטי אחיד  $B = 5T$  לתוך הדף. מסת המטען היא  $m = 10gr$  ומהירותו

היא  $v_0 = 20 \frac{m}{sec}$ .

א. שרטט את תנועת המטען.

ב. מצא את המיקום בו יצא המטען מהתחום בו נמצא השדה המגנטי.

**תשובות סופיות:**

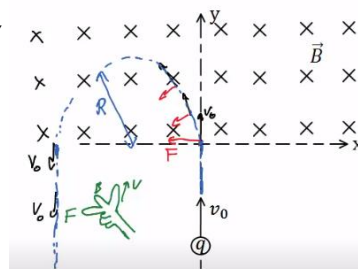
(1)  $F_B \approx 207.8N$

(2)  $F_B = 30N$

(3) א.  $\vec{F} \odot$     ב.  $\vec{F} \odot$     ג.  $\vec{F} \uparrow$     ד.  $\vec{F} \swarrow$

(4) א.  $\vec{F} \odot$     ב.  $\vec{F} \otimes$     ג.  $\vec{F} \odot$

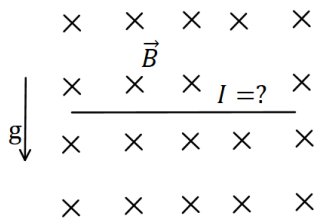
(5) א.    ב.  $x = -2cm, y = 0$



## כוח על תיל נושא זרם ובין תיילים:

### שאלות:

#### (1) דוגמה 7

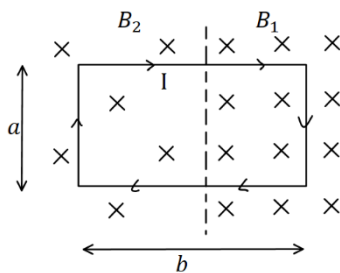


תיל ישר נמצא במאונך לשדה מגנטי אחיד  $B = 10^{-2} \text{T}$  לתוך הדף. צפיפות המסה של התיל ליחידת אורך

היא  $\lambda = 20 \frac{\text{gr}}{\text{cm}}$ .

מצא מה צריך להיות גודל וכיוון הזרם בתיל, כך שהתיל ירחף באוויר.

#### (2) דוגמה 8



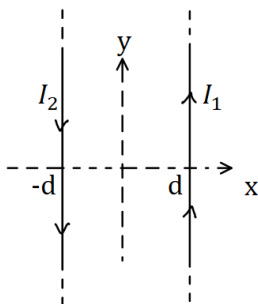
מסגרת מלבנית בעל צלעות  $a, b$  נמצאת במישור של הדף ובתוך שדה מגנטי שכיוונו לתוך הדף. גודלו של השדה המגנטי אינו אחיד.

המסגרת מונחת כך, שחלק מהמסגרת נמצא בשדה  $B_1 = 4 \text{T}$ , והחלק השני נמצא בשדה  $B_2 = 3 \text{T}$ .

במסגרת זורם זרם  $I = 2 \text{A}$  עם כיוון השעון.

מצא את הכוח השקול הפועל על המסגרת ( $a = 0.5 \text{m}$ ).

#### (3) דוגמה 9



תיל ארוך מאוד מונח במקביל לציר ה- $y$  וב- $x = d$ . בתיל זורם זרם  $I_1 = 1 \text{A}$  בכיוון.

תיל ארוך נוסף מונח גם כן במקביל לציר ה- $y$  וב- $x = -d$ .

הזרם בתיל זה הוא  $I_2 = 2 \text{A}$  בכיוון הפוך לציר ה- $y$ .

מהו הכוח ליחידת אורך על כל תיל, אם  $d = 20 \text{cm}$ ?

#### (4) דוגמה 10

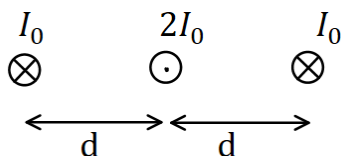
שלושה תיילים אינסופיים מונחים במקביל, כמתואר באיור.

המרחקים בין התיילים קבועים ושווים ל- $d$ .

הזרם בתיל האמצעי הוא  $2I_0$  החוצה מהדף,

והזרם בתיילים האחרים הוא  $I_0$  לתוך הדף.

מהו הכוח על כל תיל?



### תשובות סופיות:

$$(1) \text{ כיוון: ימינה, גודל: } I = 2 \cdot 10^3 \text{ A}$$

$$(2) \text{ ימינה, } \Sigma F = 1 \text{ N}$$

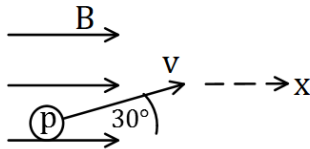
$$(3) F_1 = 10^{-6} \hat{x}, F_2 = -10^{-6} \hat{x}$$

$$(4) \Sigma F_1 = \frac{3\mu_0 I_0^2}{4\pi d} \hat{x}, \Sigma F_2 = 0, \Sigma F_3 = -\frac{3\mu_0 I_0^2}{4\pi d} \hat{x}$$

## תרגילים נוספים:

### שאלות:

#### (1) תרגיל 1



פרוטון נכנס לאזור בו ישנו שדה מגנטי אחיד שעוצמתו  $10T$  בכיוון ציר ה- $x$ . מהירות הפרוטון היא  $10^6 \frac{m}{sec}$  וכיוונה בזווית  $30$  מעלות ביחס לשדה.

א. מהו גודל וכיוון הכוח הפועל על הפרוטון?

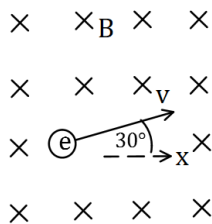
ב. מהי תאוצת הפרוטון?

נתון:  $q_p = 1.6 \cdot 10^{-19} c$ ,  $m_p = 1.67 \cdot 10^{-27} kg$

#### (2) תרגיל 2

אלקטרון נמצא בשדה מגנטי אחיד שגודלו  $5T$  וכיוונו לתוך הדף.

לאלקטרון מהירות  $v_0 = 10^5 \frac{m}{sec}$  בכיוון  $30$  מעלות ביחס לציר ה- $x$ .



א. מהו הכוח הפועל על האלקטרון ברגע זה (גודל וכיוון)?

ב. צייר את תנועת האלקטרון בשדה.

מהו רדיוס הסיבוב?

נתון:  $q_e = -1.6 \cdot 10^{-19} c$ ,  $m_e = 9.1 \cdot 10^{-31} kg$

#### (3) תיל תלוי על שני קפיצים- ביולוגיה תא

תחל מוליך נושא זרם תלוי לאורך ציר  $x$  על

ידי שני תילים דקים ושני קפיצים זהים.

בכל המרחב קיים שדה מגנטי אחיד לתוך הדף.

אורך התיל המוליך הוא  $0.4m$  ומסתו

היא  $0.03kg$ . גודל השדה המגנטי הוא  $B = 0.2T$

וקבוע הקפיץ הוא  $k = 10 \frac{N}{m}$ , ניתן להזניח את השדות שיוצרים התילים

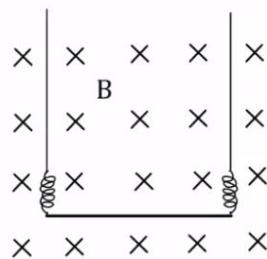
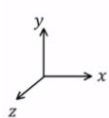
האנכיים ואת הכוחות שהם מפעילים על התיל האופקי.

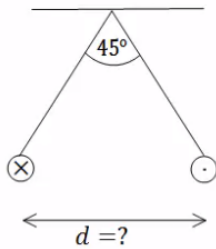
א. מהו גודל וכיוון הזרם בתיל אם ידוע שהתיל בשיווי משקל כאשר

הקפיצים רפויים (לא מפעילים כוח)?

ב. בכמה יתארכו הקפיצים אם יהפכו את הזרם בתיל? תזכורת: גודל הכוח

שמפעיל קפיץ הוא  $F = k\Delta l$  כאשר  $\Delta l$  היא ההתארכות של הקפיץ מהמצב הרפוי.



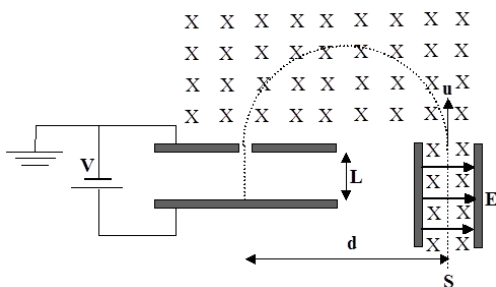


**(4) שני תילים תלויים**

שני תילים ארוכים מאוד תלויים מהתקרה באמצעות חוטים באורך זהה ולא ידוע. בתילים זרם של 100 אמפר בכיוונים מנוגדים. הזווית בין החוטים היא 45 מעלות ומסתם ליחידת

אורך היא  $\mu = 2 \frac{gr}{m}$ .

מצא את המרחק בין התילים.



**(5) בורר מהירויות ומתח עצירה**

חלקיקים, בעלי מטען +q ומסה m, נפלטים ממקור S במהירויות שונות ונכנסים אל בין לוחות קבל. בין לוחות הקבל פועלים שדה חשמלי אחיד  $\vec{E}$  שכיוונו ימינה, ושדה מגנטי אחיד  $\vec{B}$  המכוון אל תוך הדף, כמו בתרשים.

השדה המגנטי פועל על החלקיקים גם לאחר יציאתם מהקבל. במרחק d מנקודת היציאה של החלקיקים מהקבל נמצא נקב קטן, דרכו נכנסים החלקיקים אל תוך הקבל השני, אשר בין לוחותיו לא פועל שדה מגנטי. על הקבל השני מופעל מתח עצירה V. ידוע כי המרחק בין לוחות הקבל השני הינו L. ניתן להזניח את כוח הכובד הפועל על חלקיקים.

נתונים:  $\vec{B}, \vec{E}, m, q, L$ .

- א. באיזו מהירות u יוצאים החלקיקים מהקבל הראשון?
- ב. מהו המרחק d (ראה ציור)?
- ג. תוך כמה זמן משלים החלקיק את חצי הסיבוב?
- ד. מה צריך להיות ערכו המינימלי של מתח העוצר V, המופעל על הקבל השני, כדי שהחלקיקים הנכנסים לתוכו יעצרו לחלוטין?
- ה. מחברים את הקבל השני לסוללה, שמתחה גדול פי שתיים ממה שחישבת בסעיף ד'. תוך כמה זמן יעצור החלקיק מרגע כניסתו אל בין לוחות הקבל השני כעת?

## תשובות סופיות:

$$(1) \quad \text{א. } F = 8 \cdot 10^{-13} \text{ N, כיוון: לתוך הדף.} \quad \text{ב. } a = 4.79 \cdot 10^{14} \frac{\text{m}}{\text{sec}^2}$$

$$(2) \quad \text{א. } F = 8 \cdot 10^{-11} \text{ N, כיוון } 60^\circ \text{ מתחת לציר ה-} x \text{.} \quad \text{ב. } R = 1.14 \cdot 10^{-7} \text{ m}$$

$$(3) \quad \text{א. } I = 3.75 \text{ A, כיוון: חיובי של ציר } x \text{.} \quad \text{ב. } \Delta l = 0.03 \text{ m}$$

$$(4) \quad d = 0.241 \text{ m}$$

$$(5) \quad \text{א. } u = \frac{E}{B} \quad \text{ב. } d = \frac{2mE}{qB^2} \quad \text{ג. } t = \frac{\pi}{qB} \text{ m} \quad \text{ד. } V = \frac{mE^2}{2qB^2} \quad \text{ה. } t = \frac{BL}{E}$$

# יסודות הפיזיקה ב (20114)

פרק 4 - חוק פארדיי

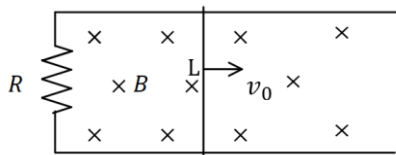
תוכן העניינים

1. הרצאות ותרגילים ..... 26

## הרצאות ותרגילים:

### שאלות:

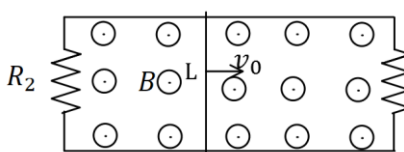
#### (1) מוט נע על מסילה



מוט מוליך נע על מסילה העשויה ממוליכים גם כן. בקצה המסילה ישנו נגד R. מהירות המוט היא  $v_0$  ואורכו L. במרחב ישנו שדה מגנטי אחיד לתוך הדף B.

- מהו הכא"מ במוט?
- מהו הזרם בנגד גודל וכיוון?
- מהו הכוח המגנטי הפועל על המוט?
- מהו הכוח החיצוני הדרוש על מנת להזיז את המוט במהירות קבועה?

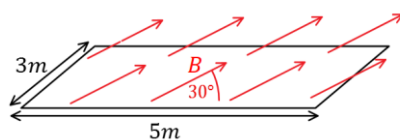
#### (2) המסילה מחוברת משני הצדדים



מוט מוליך נע על מסילה, העשויה ממוליכים גם כן. בשני קצוות המסילה ישנם נגדים:  $R_1 = 2\Omega$ ,  $R_2 = 3\Omega$ . מהירות המוט היא:  $v_0 = 5 \frac{m}{sec}$  ואורכו:  $L = 20cm$ . במרחב ישנו שדה מגנטי אחיד החוצה מהדף  $B = 1T$ .

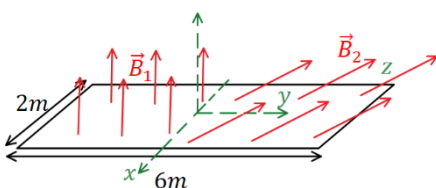
- מהו הכא"מ במוט?
- מהו הזרם בכל נגד ובמוט (גודל וכיוון)?
- מהו הכוח החיצוני הדרוש על מנת להזיז את המוט במהירות קבועה?

#### (3) חישוב שטף אחיד



באיור הבא נתון כי השדה המגנטי על המשטח זהה בכל נקודה (שדה אחיד). גודלו הוא  $B = 2T$  והזווית בינו למשטח היא  $30^\circ$ . אורך המשטח הוא 5m ורוחבו הוא 3m. מצא מהו השטף דרך המשטח.

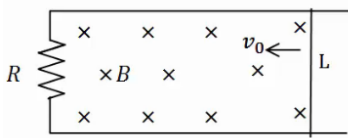
#### (4) חישוב שטף מפוצל



באיור הבא נתון משטח המונח על מישור xy. אורך המשטח הוא 6m ורוחבו הוא 2m. השדה המגנטי בחציו השמאלי של המשטח הוא:  $\vec{B}_1 = 2T\hat{z}$ , שדה אחיד. בחציו הימני של המשטח השדה הוא:  $\vec{B}_2 = 7T\hat{y} + 3T\hat{z}$ . מצא מהו השטף דרך המשטח.

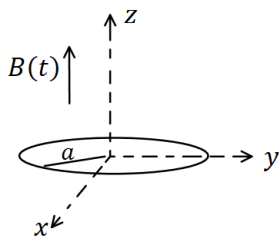
**(5) עוד מוט ומסילה**

מוט מוליך נע על מסילה העשויה ממוליכים גם כן. בקצה המסילה ישנו נגד  $R$ , מהירות המוט היא  $v_0$  ואורכו  $L$ . במרחב ישנו שדה מגנטי אחיד לתוך הדף  $B$ .



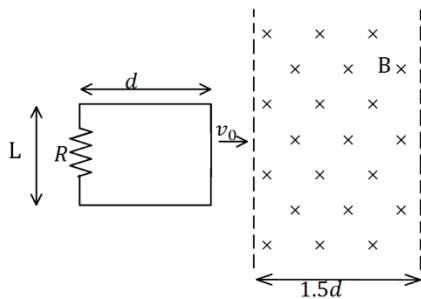
- א. מהו הכא"מ במעגל לפי חוק פארדיי (גודל וכיוון)?
- ב. מהו הזרם בנגד גודל וכיוון?
- ג. חשב את הכא"מ לפי הנוסחה של כא"מ במוט ומצא את כיוון הזרם. הראה שהתוצאה זהה.

**(6) טבעת ושדה משתנה בזמן**



- טבעת עשויה מחומר מוליך מונחת על מישור  $xy$ .
- רדיוס הטבעת הוא  $a$  והתנגדותה הכוללת  $R$ .
- בכל המרחב קיים שדה מגנטי אחיד בכיוון  $z$ , המשתנה בזמן לפי הנוסחה  $B(t) = \alpha t$  כאשר  $\alpha$  קבועה.
- א. מצא את הכא"מ בטבעת.
- ב. מהו הזרם בטבעת גודל וכיוון.

**(7) מסגרת נכנסת לשדה**



מסגרת מלבנית בעלת אורך  $d$  ורוחב  $L$ , נעה במהירות קבועה  $v_0$ , לכיוון אזור בו שורר שדה מגנטי אחיד  $B$ . אורך האזור הוא  $1.5d$  ורוחבו ארוך מאוד. למסגרת התנגדות כוללת  $R$ . הנח כי ב- $t = 0$  הצלע הימנית של המסגרת נכנסת לאזור עם השדה.

- א. מצא את הכא"מ במסגרת (כתלות בזמן).
- ב. מצא את הזרם במסגרת, גודל וכיוון(כתלות בזמן).
- ג. מצא את הכוח הדרוש להפעיל על המסגרת, על מנת שתנוע במהירות קבועה.
- ד. מהו ההספק של הכוח ומהו ההספק שהופך לחום בנגד?

## תשובות סופיות:

$$(1) \quad \varepsilon = BLv_0 \quad \text{א.} \quad \text{ב. נגד כיוון השעון,} \quad I = \frac{BLv_0}{R} \quad \text{ג.} \quad F = \frac{B^2L^2v_0}{R}$$

$$F = \frac{B^2L^2v_0}{R} \quad \text{ד.}$$

$$(2) \quad \varepsilon = 1V \quad \text{א.} \quad \text{ב.} \quad I_1 = 0.5A, I_2 = \frac{1}{3}A, I_3 = \frac{5}{6}A \quad \text{ג.} \quad F = \frac{1}{6}N$$

$$\phi_B = 15T \cdot m^2 \quad (3)$$

$$\phi_B = 30T \cdot m^2 \quad (4)$$

$$(5) \quad \text{א. עם כיוון השעון,} \quad |\varepsilon| = |BLv_0| \quad \text{ב.} \quad I = \frac{BLv_0}{R} \quad \text{ג.} \quad \varepsilon = BLv_0$$

$$(6) \quad \text{א.} \quad |\varepsilon| = \alpha\pi a^2 \quad \text{ב.} \quad I = \frac{\alpha\pi a^2}{R}$$

$$(7) \quad \varepsilon = \begin{cases} -BLv_0 & x < d \\ 0 & d < x < 1.5d \\ BLv_0 & 1.5d < x < 2.5d \end{cases}$$

$$I = \begin{cases} \frac{BLv_0}{R} \text{ anticlockwise} & x < d \\ 0 & d < x < 1.5d \\ \frac{BLv_0}{R} \text{ clockwise} & 1.5d < x < 2.5d \end{cases}$$

$$P = I^2R = \begin{cases} \frac{B^2L^2v_0}{R} \\ \frac{B^2L^2v_0}{R^2} \end{cases} \quad \text{ד.}$$

$$\vec{F} = \begin{cases} \frac{B^2L^2v_0}{R} \hat{x} & x < d \\ 0 & d < x < 1.5d \\ \frac{B^2L^2v_0}{R} \hat{x} & 1.5d < x < 2.5d \end{cases} \quad \text{ה.}$$

# יסודות הפיזיקה ב (20114)

פרק 5 - מעגלי זרם חילופין

תוכן העניינים

1. מעגלי זרם חילופין..... 29

## מעגלי LC ו-RLC:

רקע:

### מעגל LC:

משוואות המעגל:

$$I = -\dot{q} - \frac{q}{C} + L\ddot{q} = 0$$

(ניתן גם להגיע לאותה משוואה על הזרם)

המשוואה היא משוואה של תנועה הרמונית פשוטה.

פתרון:

$$q(t) = A \cos(\omega t + \varphi)$$

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{LC}} \text{ כאשר}$$

האנרגיה האגורה במעגל:

$$E = \frac{1}{2} \frac{q^2}{C} + \frac{1}{2} LI^2$$

(האנרגיה הכוללת נשמרת)

### מעגל RLC:

משוואת המעגל:

$$I = -\dot{q} - \ddot{q} + \frac{R}{L}\dot{q} + \frac{1}{LC}q = 0$$

(ניתן גם להגיע לאותה משוואה על הזרם)

המשוואה היא משוואה של תנועה הרמונית מרוסנת.

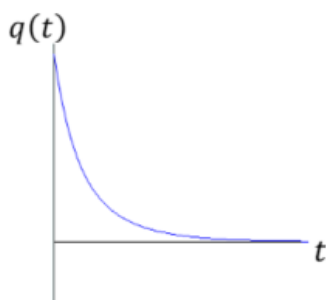
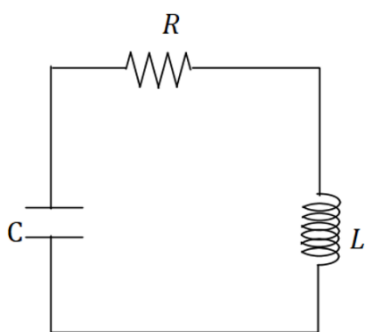
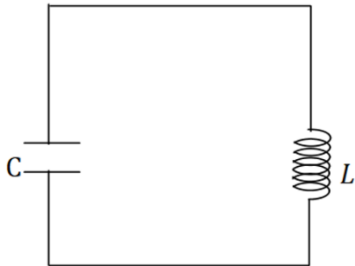
$$\Gamma = \frac{R}{2L} \text{ ו- } \omega_0^2 = \frac{1}{LC} \text{ נגדיר}$$

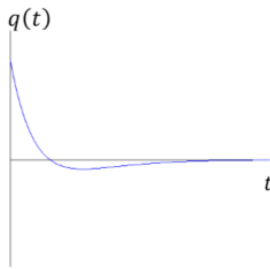
הפתרון מתחלק לשלושה מקרים:

מקרה 1 - ריסון חזק:  $\Gamma > \omega_0$

$$q(t) = Ae^{-\lambda_1 t} + Be^{-\lambda_2 t}$$

$$\lambda_{1,2} = \Gamma \pm \sqrt{\Gamma^2 - \omega_0^2}$$



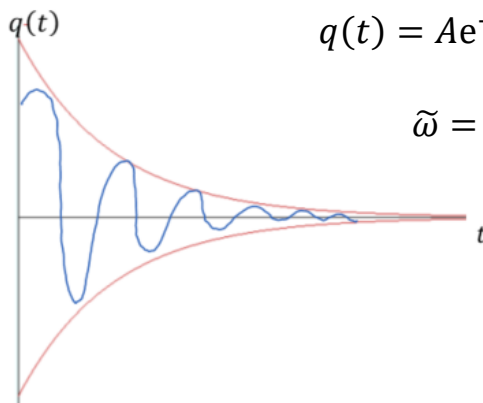


מקרה 2 - ריסון קריטי:  $\Gamma = \omega_0$

$$q(t) = Ae^{-\omega_0 t} + Bte^{-\omega_0 t}$$

בריסון קריטי קצב הדעיכה הוא הגבוה ביותר משלושת המקרים.

מקרה 3 - ריסון חלש:  $\Gamma < \omega_0$



$$q(t) = Ae^{-\Gamma t} \cos(\tilde{\omega}t + \varphi)$$

$$\tilde{\omega} = \sqrt{\omega_0^2 - \Gamma^2}$$

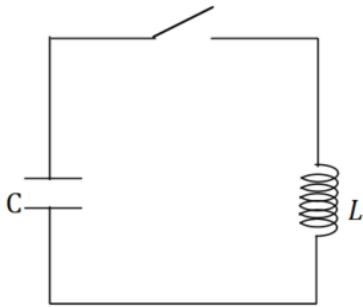
בכל המקרים האנרגיה של המעגל (שאגורה בסליל ובקבל) דועכת בקצב כפול.

$$E \propto e^{-2\Gamma t}$$

(בריסון חזק קבוע הדעיכה הוא  $\lambda$  במקום  $\Gamma$ )

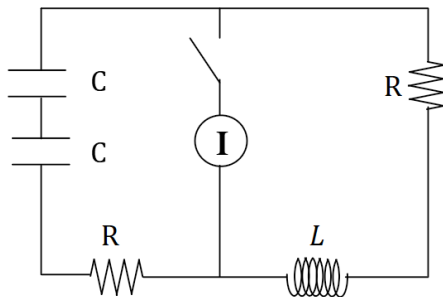
## שאלות:

## (1) LC



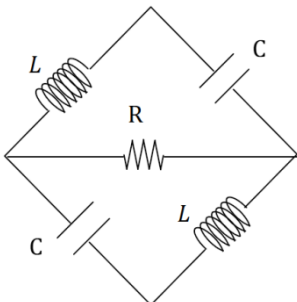
- במעגל הבא  $C = 100\mu\text{F}$  ו- $L = 40\text{mH}$ .  
 בהתחלה המתג פתוח והקבל טעון ב- $12\mu\text{C}$ .  
 א. מה הזרם במעגל ברגע סגירת המתג?  
 ב. מהי התדירות וזמן המחזור של המעגל?  
 ג. מתי הזרם מקסימאלי?  
 ד. מהי האנרגיה בסליל כתלות בזמן?  
 מהי האנרגיה בקבל כתלות בזמן?  
 ומהי האנרגיה הכוללת כתלות בזמן?

## (2) RLC עם מקור זרם



- במעגל הבא ישנו מקור המספק זרם קבוע.  
 ברגע  $t=0$  סוגרים את המפסק.  
 א. מהם הזרמים במעגל כתלות בזמן אם ידוע ש- $R^2C < 2L$ ?  
 ב. מצא את המתח כתלות בזמן של המקור.

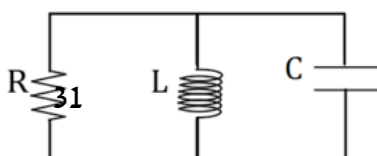
## (3) מעגל RLC יהלום



- במעגל הבא הקבל העליון טעון ב- $t=0$  במטען  $Q$  והקבל התחתון פרוק.  
 באותו הזמן גם אין זרם במעגל.  
 א. כתוב את המשוואות הדיפרנציאליות עבור ההתפתחות בזמן של המטען על כל אחד מהקבלים.  
 ב. פתור את המשוואות בצורה כללית (אין צורך להציב את תנאי ההתחלה).  
 הדרכה: בצע החלפת משתנים ל- $q_+ = q_1 + q_2$  ו- $q_- = q_1 - q_2$ .  
 ג. מהם הזרמים בנגד ובקבל לאחר זמן רב? כמה אנרגיה תהפוך לחום מ- $t=0$  ועד זמן רב מאוד?

## (4) סליל נגד וקבל במקביל

- קבל בעל קיבול  $C$ , סליל בעל השראות  $L$  ונגד  $R$  מחוברים במקביל.



- א. נתון כי ב- $t=0$  המטען על הקבל הוא  $q_0$ .  
 הראו כי המטען על הקבל כתלות בזמן מקיים את המשוואה:  $\ddot{q} + \frac{\dot{q}}{RC} + \frac{q}{LC} = 0$ .
- ב. הראו כי  $q(t) = q_0 e^{-\alpha t} \cos(\omega t)$  הוא פתרון למשוואה ומצאו מה הערכים של  $\alpha$  ו- $\omega$  כפונקציה של  $L, R$  ו- $C$ .
- ג. הראו כי אם אמפליטודת המטען במעגל יורדת לחצי לאחר  $n$  מחזורים אז:  $\frac{\sqrt{\omega_0^2 - \omega^2}}{\omega} = \frac{\ln 2}{2\pi n}$  כאשר  $\omega_0$  היא תדירות התהודה של המעגל.

## מעגלים עם מקור מתח חילופין

רקע:

משוואת המעגל:

$$I = \dot{q} - \ddot{I} + \frac{R}{L}\dot{I} + \frac{1}{LC}I = -\omega V_0 \sin(\omega t)$$

(ניתן גם להגיע למשוואה דומה עבור המטען)

המשוואה היא משוואה של תנועה הרמונית מאולצת.

פתרון המשוואה:

$$I(t) = I_{max}(\omega) \cos(\omega t + \varphi) + \text{פתרון הומוגני}$$

הפתרון ההומוגני הוא הפתרון של מעגל RLC והוא דועך בזמן.

הפתרון הפרטי נקרא הפתרון של המצב העמיד (לאחר זמן רב) בד"כ מתייחסים רק אליו.

$$I_{max}(\omega) = \frac{V_0}{\sqrt{\left(\frac{1}{\omega C} - \omega L\right)^2 + R^2}}$$

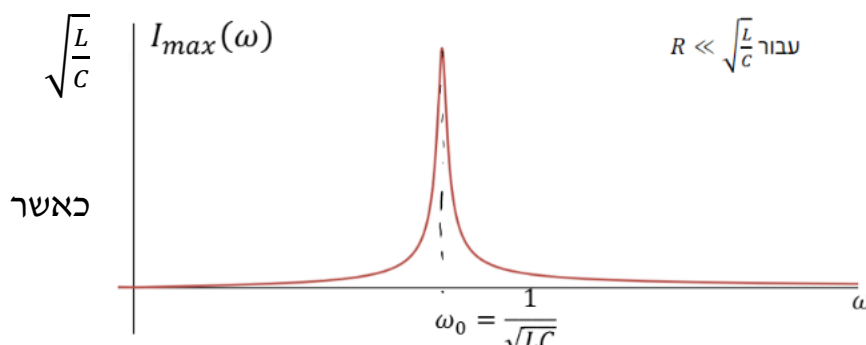
$$\tan \varphi = \frac{\frac{1}{\omega C} - \omega L}{R}$$

תהודה:

מצב שבו  $I_{max}(\omega)$  מקסימאלי.

- שימו לב,  $I_{max}$  הוא אמפליטודת הזרם במעגל עם מקור בעל תדירות  $\omega$  מסוימת. תהודה מדברת על איזה תדירות צריך שתהיה למקור כך שהאמפליטודה הזו תהיה הכי גבוהה שאפשר.

- בשביל למצוא את תדירות התהודה במקרה כללי צריך לגזור את  $I_{max}$  לפי  $\omega$  ולהשוות לאפס.



עבור  $R \ll$

מקבלים

אמפליטודה

מקסימאלית

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

**פתרון עם מספרים מורכבים :**

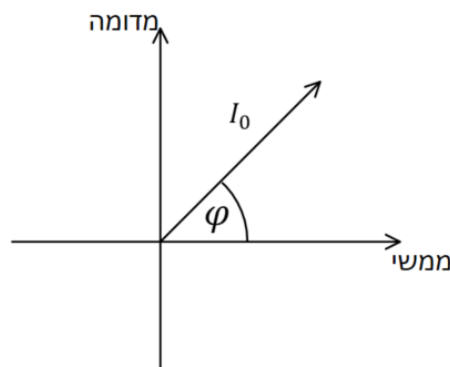
אם כל המשתנים הם פונקציות מהצורה  $A \cos(\omega t + \varphi)$  והמשוואות שלנו לינאריות. אז יותר נוח לעבוד עם מספרים מורכבים.

$$I(t) = I_0 \cos(\omega t + \varphi) = \text{Re}\{\tilde{I}(t)\}$$

$$\tilde{I}(t) = I_0 e^{i(\omega t + \varphi)}$$

(בדרי"כ לא רושמים את הגל)

בעבודה עם מספרים מורכבים אפשר להוריד את התלות בזמן

**פאזור :**

תאור של המספר המורכב באמצעות וקטור במערכת דו מימדית.

הפאזור מסתובב בזמן אבל בדרי"כ מסתכלים רק על הפאזור ב  $t=0$

**עכבה Impedance :**

$$Z = \frac{\tilde{V}}{\tilde{I}}$$

תכונה שתלויה רק במבנה (קבועה)

הפאזה של העכבה היא הפאזה של המתח ביחס לזרם ברכיב

$$\varphi_Z = \varphi_V - \varphi_I$$

הגודל של העכבה

$$|Z| = \frac{V_{max}}{I_{max}}$$

הרכיב	העכבה של הרכיב Z	הפאזה של המתח ביחס לזרם ברכיב המתח והזרם בנגד הם באותה הפאזה
נגד	R	בסליל המתח מקדים את הזרם ב $\frac{\pi}{2}$
סליל	$i\omega L$	בקבל המתח מפגר אחרי הזרם ב $\frac{\pi}{2}$
קבל	$\frac{1}{i\omega C}$	

ניתן לחבר עכבות בדיוק כמו חיבור של נגדים ולקבל את העכבה הכוללת של המעגל

$$\tilde{V}_S = Z_T \tilde{I}_S$$

כאשר  $\tilde{V}_S$  ו- $\tilde{I}_S$  הם הזרם והמתח של המקור (בייצוג המורכב)

### ערכי RMS:

ממוצע של ריבוע הגודל בזמן

$$V_{RMS} = \frac{V_{max}}{\sqrt{2}}, \quad I_{RMS} = \frac{I_{max}}{\sqrt{2}}$$

### הספק רגעי:

$$P(t) = V(t)I(t)$$

לשים לב שההספק הרגעי הוא לא גודל לינארי ולכן אי אפשר לחשב אותו באמצעות הייצוג המורכב של המתח והזרם.

### הספק ממוצע:

$$\bar{P} = \frac{V_{max} I_{max}}{2} \cos \varphi = V_{RMS} I_{RMS} \cos \varphi$$

כאשר  $\varphi$  היא הפאזה של המתח ביחס לזרם

$\cos \varphi$  הוא מקדם/גורם ההספק. מצביע על ניצול האנרגיה במעגל

## שאלות:

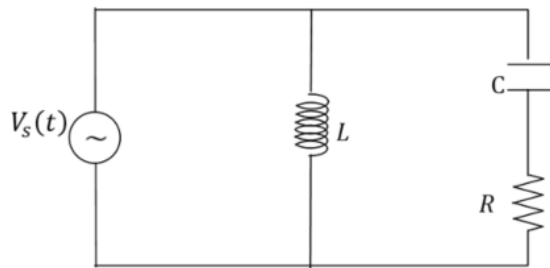
## 5 קבל ונגד בטור ובמקביל לסליל

במעגל הבא נתון:

$$R = 50\Omega, L = 30mH, V_s(t) = 3 \cos(10t)$$

$$C = 300\mu F$$

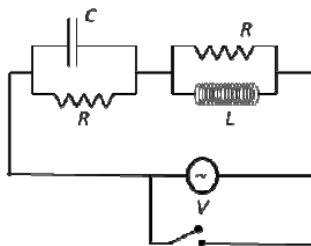
- מהי העכבה הכוללת של המעגל?
- מהי הפאזה של המתח של המקור ביחס לזרם במקור?
- רשמו את פונקציית הזרם במקור כתלות בזמן.
- רשמו את הזרם בסליל כתלות בזמן.
- רשמו את המתח על הקבל כתלות בזמן.



## 6 מקור, סליל ונגד בטור עם קבל ונגד

במעגל הבא נתונים:  $R, C, L$  ומתח המקור

$$V(t) = V_0 \cos(\omega t)$$



- מהי העכבה הכוללת של המעגל?
- עבור איזה תדר של המקור אין הפרש מופע בין הזרם למתח?
- מקצרים את המקור, ונתון המטען ההתחלתי על הקבל  $Q_0$ .
  - עבור אילו ערכים של  $R$  תהיה דעיכה ללא תנודות?
  - מה הזמן האופייני לאיבוד אנרגיה?

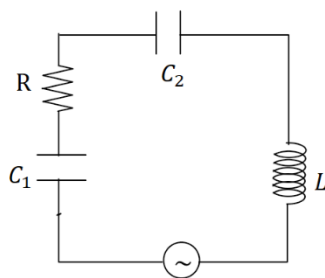
## 7 מעגל טורי עם שני קבלים

במעגל הבא נתון:

$$I(t) = 4 \cos(2000t + \varphi), (2000t)$$

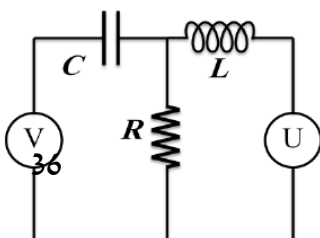
$$C_1 = 100\mu F, L = 10mH, R = 10\Omega$$

המתח והזרם בוולט ואמפר



- מצאו את הקיבול  $C_2$ .
- מצאו את הפאזה של הזרם.
- מצאו את ההספק הממוצע של המקור.

## 8 שני מקורות סליל וקבל במקביל לנגד

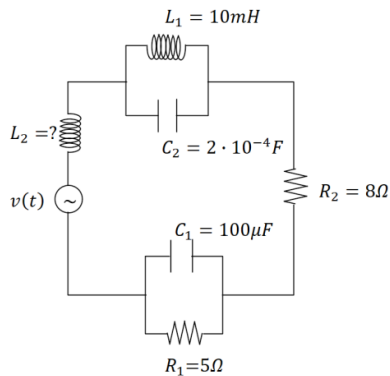
במעגל הבא  $U$  ו- $V$  הם שני מקורות מתח חילופין.

נתון:  $R, L, C$ .

והמתחים:  $U(t) = U_0 \cos(\omega t), V(t) = V_0 \cos(\omega t)$ .

א. מצא את הזרם בנגד במצב העמיד.

ב. מה התנאי לכך שהזרם יתאפס?



### 9) מעגל זרם חילופין

במעגל הבא נתון כי מתח המקור הוא:

$$v(t) = 50 \cos(1000t)$$

כמו כן הזרם העובר בנגד  $R_2$  הוא:

$$I_2(t) = I_0 \cos\left(1000t - \frac{\pi}{4}\right)$$

א. מצא את השראות הסליל  $L_2$  ואת  $I_0$ .

ב. מצא את הזרם בקבל  $C_1$  ב- $t = 2$ .

ג. חשב את ההספק הממוצע של מקור המתח.

## תשובות סופיות:

$$\omega = 500 \frac{\text{rad}}{\text{sec}}, f = 80\text{Hz}, T = 4\pi \cdot 10^{-3}\text{sec} \quad \text{א. 0} \quad (1)$$

$$n = 1, 2, 3, \dots \text{ כאשר: } \pi \cdot 10^{-3} + 2\pi n \cdot 10^{-3} \quad \text{ג.}$$

$$U_L(t) = 720 \cdot 10^{-9} J \sin^2(500t) \quad \text{ד. בסליל:}$$

$$U_C(t) = 720 \cdot 10^{-9} J \cos^2(500t) \quad \text{בקבל:}$$

$$E(t) = 720 \cdot 10^{-9} J \quad \text{כוללת:}$$

$$I_2(t) = I e^{-\Gamma t} \cos(\tilde{\omega} t), I_1(t) = I(1 - e^{-\Gamma t} \cos(\tilde{\omega} t)) \quad \text{א. 2}$$

$$\tilde{\omega} = \sqrt{\omega_0^2 - \Gamma^2}, \Gamma = \frac{R}{L}, \omega_0^2 = \frac{2}{LC} \quad \text{כאשר}$$

$$V_S(t) = I[R(1 - e^{-\Gamma t} \cos(\tilde{\omega} t)) + L(\Gamma e^{-\Gamma t} \cos(\tilde{\omega} t) - \tilde{\omega} \sin(\tilde{\omega} t))] \quad \text{ב.}$$

$$L\dot{I}_1 + \frac{q_1}{C} + (I_1 - I_2)R = 0, L\dot{I}_2 + \frac{q_2}{C} + (I_2 - I_1)R = 0 \quad \text{א. 3}$$

$$q_2(t) =, q_1(t) = \frac{1}{2}(A \cos(\omega t + \varphi) + B e^{-\Gamma t} \cos(\tilde{\omega} t + \theta)) \quad \text{ב.}$$

$$\frac{1}{2}(A \cos(\omega t + \varphi) - B e^{-\Gamma t} \cos(\tilde{\omega} t + \theta))$$

$$\tilde{\omega} = \sqrt{\omega_0^2 - \Gamma^2}, \Gamma = \frac{R}{L}, \omega_0^2 = \frac{1}{LC} \quad \text{כאשר}$$

$$\text{ג. הזרמים בקבלים זהים ושווים ל } I = -\frac{1}{2} A \omega \sin(\omega t + \varphi) \text{ הזרם בנגד}$$

$$\frac{Q^2}{4C} \quad \text{מתאפס. האנרגיה שהפכה לחום}$$

$$\text{שאלת הוכחה.} \quad (4)$$

$$I_S(t) = 12_A \cos(10t - 2.16) \quad \text{ג. } 2.16\text{rad} \quad \text{א. } -0.138 + 0.209i \quad (5)$$

$$V_C(t) = 2.9_V \cos\left(10t - \frac{\pi}{2}\right) \quad \text{ה.} \quad I_L(t) = 10_A \cos\left(10t - \frac{\pi}{2}\right) \quad \text{ד.}$$

$$Z = \left(\frac{\omega^2 L^2}{R^2 + \omega^2 L^2} + \frac{1}{(\omega RC)^2 + 1}\right) R + i \left(\frac{\omega L}{R^2 + \omega^2 L^2} - \frac{\omega C}{(\omega RC)^2 + 1}\right) R^2 \quad \text{א. 6}$$

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{LC}} \quad \text{ב.}$$

$$\tau = \frac{RC}{2} \quad \text{ii. } \frac{1}{R} > \sqrt{\frac{C}{L}} \quad \text{i. ג.}$$

$$\bar{P}_S = 253W \quad \text{ג. } \varphi = 0.886\text{rad} \quad \text{א. } C_2 = 18.35\mu F \quad (7)$$

$$\omega^2 = \frac{U_0}{LcV_0} \quad \text{ב.} \quad I_3 = \frac{(\omega c V_0 - \frac{U_0}{\omega L})(i - R(\omega c - \frac{1}{\omega L}))}{1 + R^2(\omega c - \frac{1}{\omega L})^2} \quad \text{א. 8}$$

$$43.5W \quad \text{ג.} \quad I_{C1} = 9.38A \quad \text{ב.} \quad I_0 = 2.46A, L_2 = 40.3 \cdot 10^3 H \quad \text{א. 9}$$



# יסודות הפיזיקה ב (20114)

פרק 6 - אופטיקה

תוכן העניינים

1. מבוא לאופטיקה ..... 40

## מבוא לאופטיקה:

רקע:

חוק סנל:  $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$

נוסחת העדשות:  $\frac{1}{u} + \frac{1}{v} = \frac{1}{f}$

הגדלה קווית:  $m = \frac{H_i}{H_o} = \frac{|v|}{|u|}$

עוצמת העדשה:  $C = \frac{1}{f}$

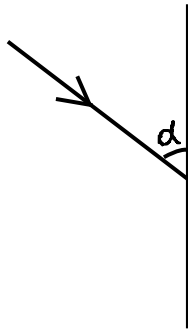
שאלות:

### 1) תרגול אור במרחב

- מציבים מקור אור נקודתי מול מסך במרחק 4m מהמסך. במרחק 1m ממקור האור מציבים מחסום בגובה 1.5m.
- שרטט את הבעיה בקנה מידה לבחירתך.
  - מצא את גודלו של הצל על הקיר:
    - בעזרת שרטוט.
    - בעזרת חישוב.
  - היכן היה צריך למקם המחסום, כדי שגודל הצל יהיה 2.5m?
  - מוסיפים מקור אור זהה (בניסוי המקורי), במרחק של 1m מתחת למקור הראשון. מצא, בעזרת שרטוט, את אזורי האור והצל השונים שמתקבלים.

### 2) תרגול אור במרחב 2

- מהירות האור בריק היא:  $C = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{sec}}$ .
- היעזר בדף הנוסחאות, ומצא תוך כמה זמן מגיעה קרן אור שמוחזרת מהירח – אל כדור הארץ.
  - מצא תוך כמה זמן מגיעה קרן היוצאת מהשמש אל כדור הארץ.
  - אם אני מדליק פנס עכשיו, וחבר נמצא במרחק 3m ממני, תוך כמה זמן יגיע אליו האור מהפנס, מרגע שהדלקתי אותו?
  - שנת אור מוגדרת כמרחק שאור עובר בשנה. מצאו מהי שנת אור בעזרת הגדרה זו.

**(3) החזרה תרגיל 1**

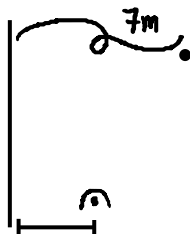
נתון מקור אור הפולט אור ומולו מוצבת מראה.  
הזווית  $\alpha$  בשרטוט שווה  $76^\circ$ .

- מה זווית ההחזרה של הקרן המשורטטת בתרשים?
- מצא, בעזרת שתי קרניים נוספות לבחירתך, את מיקום הדמות המדומה של העצם הנ"ל.
- מצא את שדה הראייה של העצם הנ"ל.
- מכסים בבד סגול את החצי העליון של המראה. האם עדיין תיווצר דמות של העצם?

**(4) החזרה תרגיל 2**

נתון התרשים הבא, בו נער בגובה 1.7m עומד לפני מראה.  
א. שרטט קרן אור היוצאת מידו הימנית של הנער, פוגעת במראה וחוזרת לעיניו (הקרן מייצגת את הקרן/ הקרניים, שבזכותן הנער רואה את ידו במראה).  
ב. שרטט (הכי מדויק שאפשר), את דמות הנער במראה.  
ג. מציבים מאחורי המראה מסך סגול. האם עדיין יראה הנער את דמותו?

- מה הגובה המינימאלי של המראה שיש להציב, כדי שדמות הנער תתקבל במלואה?
- מרחיקים את המראה למרחק כפול מגוף הנער. כיצד תשתנה תשובתך לסעיף ד'?

**(5) החזרה תרגיל 3**

מציבים מטבע מול מראה, במרחק 7m ממנה, כמתואר בתרשים.  
אדם שנמצא במורד התרשים רואה את המטבע בזווית  $30^\circ$ ,  
ביחס לקו המקביל למראה, ואת דמותו של המטבע בזווית  $50^\circ$ .  
חשב את מרחקו של האדם מהמראה.

**(6) תרגול חוק סנל 1**

- קרן לייזר מתקדמת במים ( $n_{\text{water}} = 1.33$ ), ופוגעת במשטח זכוכית ( $n_{\text{glass}} = 1.5$ ).  
חלק מהקרן נשבר לזכוכית וחלק מוחזר.  
הזווית בין פני המים והקרן הפוגעת היא  $60^\circ$ .
- חשבו את זווית השבירה.
  - שרטטו את המקרה הנ"ל.

**(7) תרגול חוק סנל 2**

תלמיד שלח קרני אור בזוויות שונות מאוויר לעבר חומר שקוף בעל מקדם שבירה לא ידוע, ומדד את זוויות הפגיעה והשבירה המתאימה לה לזוויות פגיעה שונות. תוצאות המדידות בטבלה שלפניך:

$\theta_1$	$\theta_2$
0	0
10	7.33
20	14.57
30	21.57
40	28.21
50	34.28
60	39.55
70	43.71
80	46.40

- א. האם גרף  $\theta_2(\theta_1)$  מצופה שיצא לינארי?  
 ב. הגדר משתנים עבורם כן תצפה לקבל גרף לינארי.  
 ג. שרטט גרף לינארי זה.  
 ד. מצא, בעזרת הגרף, את מקדם השבירה של החומר השקוף הלא ידוע.

**(8) החזרה גמורה תרגיל 1**

קרן אור מתקדמת בזכוכית ( $n = 1.5$ ), ופוגעת בגבול בין זכוכית זו ובין מים ( $n = 1.33$ ), בזוויות:

א.  $\theta_1 = 0^\circ$

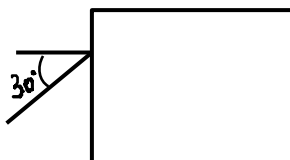
ב.  $\theta_1 = 30^\circ$

ג.  $\theta_2 = 70^\circ$

שרטט את המשך מהלך הקרן, לאחר הפגיעה, בכל אחד משלושת המקרים.

**(9) החזרה גמורה תרגיל 2**

נתון מלבן מפרספקס  $n = 1.5$ , כמתואר בתרשים. קרן אור, המגיעה משמאל, פוגעת בפרספקס בזווית פגיעה של  $30^\circ$ . השלם את מהלך הקרן בתוך הפרספקס.

**(10) עדשה מרכזת - תרגיל 1**

נתונה עדשה מרכזת בעלת מוקד  $f = 8\text{cm}$ .

נתון עצם, בגובה  $H_0 = 4\text{cm}$  המונח במרחק  $12\text{cm}$  מהעדשה.  
 א. מצא בעזרת שרטוט את:

i. מיקום הדמות הנוצרת.

- ii. גובה הדמות.
- iii. ההגדלה הקווית.
- ב. מצא בעזרת חישובים את:
  - i. מיקום הדמות.
  - ii. גובה הדמות.
  - ג. מצא מה אופי הדמות.
  - ד. שרטט שתי קרניים היוצאות ממרכז העצם, פוגעות בעדשה וממשיכות לצדה השני.

### 11) עדשה מרכזת - תרגיל 2

- לעדשה מרכזת מרחק מוקד של 11cm.
- מציבים עצם, שגובהו 5cm, במרחק 4cm מעדשה זו.
- א. מצא בעזרת שרטוט את:
  - i. מרחק הדמות מהעדשה.
  - ii. גובה הדמות.
  - iii. ההגדלה הקווית.
- ב. מצא בעזרת חישוב מספרי את:
  - i. מרחק הדמות מהעדשה.
  - ii. גובה הדמות.
- השווה תשובותיך לסעיף ב, עם אלה של סעיף א.
- ג. מניחים מסך במיקום הדמות.  
האם ניתן לראות את הדמות על המסך?
- ד. מניחים וילון שחור על המחצית העליונה של העדשה (מכסים אותה).  
האם ניתן לראות את הדמות?
- ה. מסירים וילון זה. ומניחים אותו בין העצם ודמותו.  
האם עכשיו ניתן לראות את דמות העצם?

### 12) עדשה מפזרת – תרגיל 1

- נתונה עדשה שעוצמתה  $C = 10D$ .
- לפני העדשה, במרחק  $u = 8\text{cm}$ , מניחים עצם שגובהו  $H_0 = 4\text{cm}$ .
- א. מצא בעזרת חישוב את:
  - i. מיקום הדמות.
  - ii. גובהה.
  - iii. אופי הדמות.
- ב. מצא בעזרת שרטוט את:
  - i. מיקום הדמות.
  - ii. גובהה.
- ג. מהיכן ניתן לראות את הקצה העליון של דמות העצם (שדה ראייה)?

**13) בגרות 2017 שאלה 6**

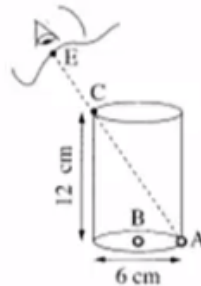
רמי ישב ליד בריכה ריקה. בתחתית הבריכה הונח מטבע, אבל ממקום מושבו של רמי לא היה אפשר לראות את המטבע כשהבריכה ריקה. התחילו למלא את הבריכה במים, וברגע מסוים ראה רמי את המטבע (רמי והמטבע לא זזו). מקדם השבירה של המים הוא:  $n = 1.33$ .

א. הגדר את תופעת השבירה של האור, וציין את סיבתה.  
 ב. הסבר מדוע ראה רמי את המטבע רק לאחר שהבריכה התמלאה חלקית במים. לווה את תשובתך בסרטוט מהלך קרניים.

נתון: קרן היוצאת מן המטבע ומגיעה לעין של רמי עוברת בתוך המים מרחק  $d = 0.61\text{m}$ .  
 זווית השבירה של קרן זו היא:  $\beta = 13.6^\circ$ .  
 ג. חשב את עומק המים.

**14) בגרות 2016 שאלה 7**

בתרשים שלפניך מוצב כלי ריק שצורתו גליל. גובה הכלי  $12\text{cm}$  וקוטרו  $6\text{cm}$ . בתחתית הכלי מונחים שני חרוזים קטנים מאוד: חרוז A צמוד לדופן הכלי וחרוז B במרכז התחתית של הכלי.



תלמיד הביט אל תוך הכלי בכיוון EC (הנקודה C נמצאת על שפת הכלי). כאשר הכלי היה ריק התלמיד ראה את חרוז A בלבד. מילאו את הכלי עד שפתו בנוזל שקוף. התלמיד הסתכל באותו כיוון וראה את חרוז B בלבד.

א. העתק את תרשים הכלי והעין למחברתך בלי הקו המקווקו. הוסף לתרשים שבמחברתך קרן אור שמגיעה מחרוז B, עוברת בתוך הנוזל אל נקודה C ומגיעה לעין התלמיד.

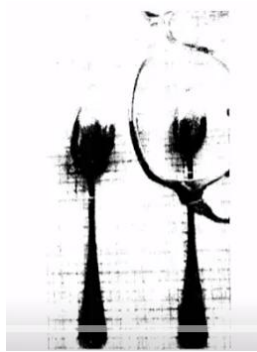
סמן בתרשים שבמחברתך את זווית הפגיעה ( $\alpha$ ) ואת זווית השבירה ( $\beta$ ) במעבר של קרן האור מהנוזל לאוויר.

ב. חשב את מקדם השבירה של הנוזל.

ג. קבע אם חרוז B נראה לתלמיד בעומק האמיתי שהוא היה בו, גבוה יותר או נמוך יותר. נמק את קביעתך באמצעות סרטוט תרשים נוסף של הכלי ומהלך הקרניים.

**15) בגרות 2016 שאלה 6**

תלמידה רצתה לבדוק את סוג העדשות במשקפיים של דודתה. לשם כך הניחה התלמידה שתי כפיות זהות על השולחן, והניחה עדשה של המשקפיים מעל אחת הכפיות. בתרשים שלפניך נראה תצלום הכפיות והמשקפיים שצילמה התלמידה.



- א. בכל אחת מן האפשרויות i-iii שלפניך, קבע מהו המאפיין הנכון של דמות הכפית הנראית מבעד לעדשה:
- i. ישרה או הפוכה.
  - ii. ממשית או מדומה.
  - iii. מוגדלת או מוקטנת.
- ב. האם העדשה מרכזת או מפזרת? נמק את תשובתך.
- ג. מצא את דמות הכפית באמצעות סרטוט מדויק של מהלך שלוש קרניים. נתון: רוחק מוקד העדשה:  $|f| = 12\text{cm}$ , מרחק העצם מהעדשה 6cm, גובה העצם 3cm.
- בסרטוט השתמש בקנה מידה של 1 משבצת=1 ס"מ.
- ד. חשב באמצעות נוסחאות את גובה הדמות ואת מרחקה מהעדשה. האם תוצאות החישוב מתאימות לאותם ערכים שהתקבלו בסרטוט?

## 16 בגרות 2015 שאלה 7

ילד הלוכש חולצה שעליה מודפסת האות F עומד מול מראה מישורית התלויה על קיר (ראה איור).



- א. מהי התופעה הפיזיקאלית שגורמת להשתקפות הילד רק במראה ולא בקיר?  
 ב. המרחק של הילד מן המראה היה 1 מטר, והוא החל להתקרב אליה

$$v = 0.5 \frac{\text{m}}{\text{sec}}$$

- במהירות קבועה:  
 חשב בתוך כמה זמן יהיה המרחק בין הילד ובין דמותו 0.5 מטר.  
 ג. לפניך ארבע צורות IV-I של האות F. העתק למחברתך את המספר של צורת הדמות של האות F, כפי שהילד שמסתכל במראה רואה אותה.

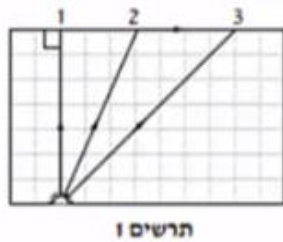


## 17 בגרות 2014 שאלה 6

- יאיר ישב במכונית ורצה לעיין במפה שבידיו (זה היה לפני עידן ה-G.P.S.).  
 בחוץ שרר חושך, ולכן יאיר הדליק נורה בתוך המכונית.  
 א. כדי שיראה היטב את המפה, האם על יאיר לכוון את אלומת האור מן הנורה לעבר עיניו או לעבר המפה? נמק.

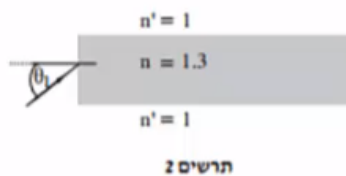
- לאחר שיאיר הדליק את הנורה הוא התבונן בשמשת החלון של מכוניתו. הוא לא ראה את הסביבה שבחוץ, אלא את דמותו המשתקפת בשמשת החלון.  
 ב. הסבר באמצעות תרשים כיצד נוצרת הדמות המשתקפת בשמשת החלון.

- יאיר מאס בפקקי התנועה שבכבישים, והחליט לנסוע ברכבת. בתוך קרון הרכבת דלק אור, ומחוץ לרכבת שרר חושך. יאיר הבחין בשתי דמויות שלו המשתקפות בחלון הרכבת. חלון הרכבת מורכב משני לוחות זכוכית מקבילים וביניהם מרווח שבו שכבת אוויר.  
 אפשר להזניח את העובי של לוחות הזכוכית.  
 ג. מדוע ברכבת הבחין יאיר בשתי דמויות, ולא בדמות אחת, כפי שראה במכוניתו? פרט את תשובתך.  
 ד. באותם תנאי תאורה הכניסו נייר שחור למרווח שבין שני לוחות הזכוכית. הנייר אוטם את כל המרווח. כמה דמויות השתקפו בחלון? נמק.

**18) בגרות 2014 שאלה 7**


מקור אור נקודתי נמצא בתוך מנסרה מלבנית (תיבה) העשויה מחומר שקוף. המנסרה נמצאת באוויר. בתרשים 1 מוצג חתך של המנסרה המקביל לשתיים מדופנות המנסרה, וכן מוצג בו מהלכן של שלוש קרניים 1, 2, 3, שמקורן במקור האור. זווית השבירה של קרן 2 היא  $90^\circ$  בקירוב.

- א. העתק את תרשים 1 למחברתך, והשלם בו במדויק את המשך המהלך של קרן 1 ושל קרן 3. הסבר את שיקולך.  
 ב. על פי התרשים, חשב את הזווית הגבולית (קריטית) למעבר אור מן החומר השקוף לאוויר.

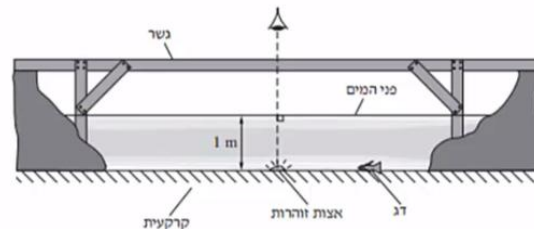


אפשר להעביר מידע למרחקים גדולים באמצעות סיבים אופטיים שאור מתפשט דרכם כמעט בלי הפסדי אנרגיה. בתרשים 2 מתואר חתך של סיב אופטי העשוי מחומר שקוף שמקדם השבירה שלו:  $n = 1.3$ , וקרן אור נכנסת לתוכו מן האוויר בזווית פגיעה  $\theta_1$ .

- ג. כאשר האור נכנס לסיב מהצד (כמתואר בתרשים 2), זווית הפגיעה  $\theta_1$  צריכה להיות קטנה מ- $57^\circ$  כדי למנוע דליפת (יציאת) אור מהסיב לאוויר. הסבר מדוע. בתשובתך היעזר בתרשים.

**19) בגרות 2013 תרגיל 1**

בגן חיות יש בריכה ובה דגים ויצורי מים מיוחדים. מושבה של אצות זוהרות (פולטות אור) נחה על קרקעית הבריכה, בעומק של 1 מטר. מקדם השבירה של מי הבריכה ביחס לאוויר הוא:  $n = 1.33$ . מעל הבריכה נמתח גשר שממנו המבקרים יכולים לצפות בבריכה (ראה תרשים). התייחס למושבת האצות כאל מקור אור נקודתי.

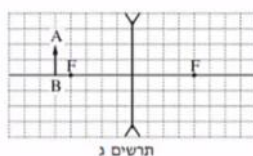
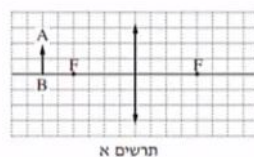
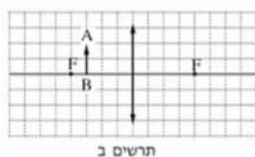


- א. האור שנפלט ממושבת האצות לעבר פני המים עובר לאוויר דרך משטח מעגלי של פני המים. הסבר מדוע. היעזר בתרשים מתאים.  
 ב. חשב את הרדיוס של המשטח המעגלי שהאור עובר דרכו לאוויר.  
 ג. אדם הניצב על הגשר בדיוק מעל מושבת האצות רואה אותה בעומק קטן יותר מהעומק האמיתי שהיא נמצאת בו. הסבר מדוע.

- ד. דג השוחה על קרקעית הבריכה, בעומק 1 מטר, רואה את השתקפות האצות באמצעות קרני אור המוחזרות מפני המים. חשב את המרחק (האופקי) המינימלי בין הדג לבין מושבת האצות, שהוא יכול לראות בו את השתקפות האצות באמצעות קרני אור המוחזרות בהחזרה מלאה.
- ה. כאשר הדג בעומק של 1 מטר, אבל המרחק בינו לבין מושבת האצות קטן יותר מהמרחק שחיבת בסעיף ד', הוא עדיין רואה את השתקפות האצות בפני המים. הסבר מדוע.

### 20 בגרות 2013 שאלה 6

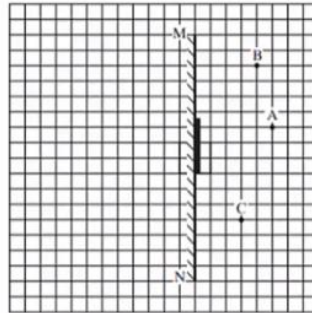
- אדם המרכיב משקפיים עם עדשות מרכזות זהות רואה בעזרתם את הדמות המדומה של עצם.
- א. הסבר את המושגים "דמות ממשית" ו"דמות מדומה", בהסברך תוכל להיעזר בתרשימים.
- ב. בתרשימים אי-ג' שלפניך החץ AB מייצג את העצם. קבע איזה תרשים מתאים לתיאור שבפתיח. נמק את קביעתך.



- ג. עוצמת העדשה היא 2 דיופטריות. מהו רוחק המוקד של העדשה?
- ד. המרחק בין הדמות לעדשה הוא 60cm. חשב את המרחק בין העצם לעדשה.

### 21 בגרות 2012 שאלה 1

- עצם ניצב לפני משטח מישורי.
- א. מה צריך להתקיים כדי שתיווצר דמות של העצם על ידי המשטח?
- ב. כאשר נוצרת דמות של העצם על ידי המשטח, איזה תנאי חייב להתקיים כדי שצופה המתבונן במשטח יראה בו את הדמות של העצם?
- באיור שלפניך מתואר חתך של מראה מישורית MN המכוסה במרכזו בכיסוי בד אטום. בנקודה A נמצא עצם נקודתי.
- בכל אחת מהנקודות B ו-C נמצא צופה (צופה B, צופה C). הנקודות A, B, C נמצאות על אותו מישור.

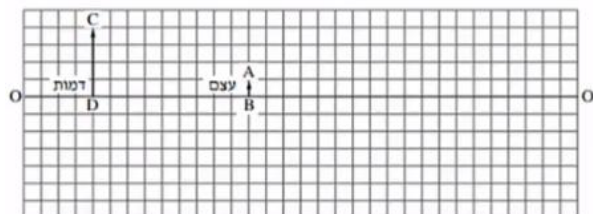


העתק למחברתך את התרשים כך שכל משבצת בתרשים תיוצג בתרשים תיוצג על ידי משבצת במחברתך.

- ג. האם צופה B וצופה C רואים את הדמות A באותו מקום? הסבר.
- ד. צלע של משבצת אחת מייצגת מרחק של 20 ס"מ במציאות. חשב את המרחק של הצופה הנמצא בנקודה C מהדמות של העצם A.
- ה. צופה C מביט אל עבר המראה, אך אינו רואה בה את דמות העין של צופה B. האם צופה B המביט אל עבר המראה רואה בה את דמות העין של צופה C? הסבר.

## (22) בגרות 2011 שאלה 1

בתרשים שלפניך הקטע  $OO'$  מסמן ציר אופטי של עדשה דקה (העדשה אינה מוצגת בתרשים). הקטע  $AB$  מסמן עצם, והקטע  $CD$  מסמן את הדמות של העצם הנוצרת בעזרת העדשה. הצלע של כל משבצת בתרשים – 1 ס"מ.



א. מדוע הדמות המתוארת בתרשים יכולה להיווצר רק בעזרת עדשה מרכזת?

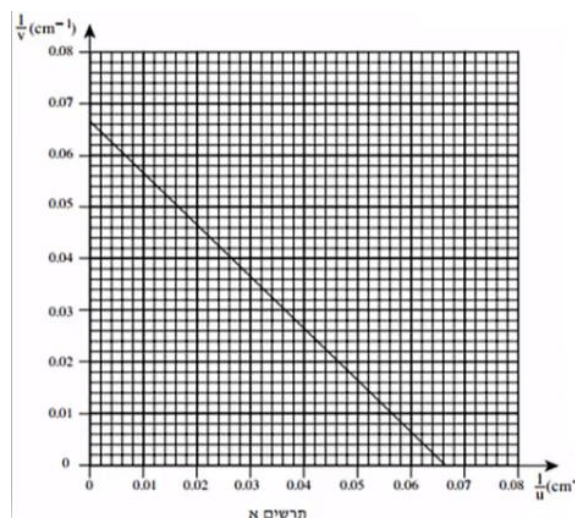
- העתק למחברתך את התרשים כך שכל משבצת בתרשים תיוצג על ידי משבצת במחברתך. השתמש בתרשים שסרטטת כדי לענות על סעיפים ב'-ג'.
- ב. מצא, בעזרת סרטוט של מהלך קרני האור, את מיקום העדשה, והוסף אותה לתרשים.
  - ג. מצא את רוחק המוקד של העדשה בשתי דרכים:
    - i. סרטוט של מהלך קרני האור.
    - ii. חישוב.
  - ד. כשהמרחק בין העצם לעדשה גדול מערך מסוים  $u_1$ , נוצרת דמות הפוכה ביחס לעצם. קבע מהו  $u_1$ .
  - ה. כשהמרחק בין העצם לעדשה שווה לערך מסוים  $u_2$ , הגדול מ- $u_1$ , נוצרת דמות באותו גובה של הדמות  $CD$  שבתרשים. מצא את  $u_2$ .

**23) בגרות 2009 שאלה 1**

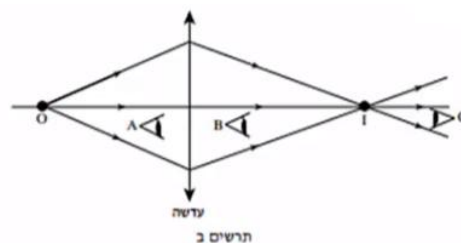
ברק הציב מקור אור במרחקים שונים מעדשה דו-קמורה דקה. בכל פעם הוא מדד את המרחק של מקור האור מן העדשה ( $u$ ), ואת המרחק של המסך שעליו התקבלה דמות חדה של מקור האור מן העדשה ( $v$ ). לאחר מכן הוא חישב את ערכי  $\frac{1}{u}$  ו- $\frac{1}{v}$ , ועל פי ערכים אלה סרטט גרף של  $\frac{1}{v}$  (ביחידות  $\text{cm}^{-1}$ ) כפונקציה

של  $\frac{1}{u}$  (ביחידות  $\text{cm}^{-1}$ ).

הגרף מוצג בתרשים א'.



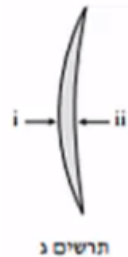
- הסבר מדוע הגרף שהתקבל הוא קו ישר.
- מצא בעזרת הגרף את רוחק המוקד של העדשה. פרט את חישוביך.
- כאשר הציב ברק את מקור האור במרחק 10 ס"מ מן העדשה, הוא לא הצליח למקם את המסך כך שתתקבל עליו דמות חדה של מקור האור. הסבר מדוע.
- בתרשים ב' שלפניך מתואר עצם נקודתי O ודמותו I, הנוצרת על ידי עדשה מרכזת דקה.



האם אפשר לראות את הדמות I גם ללא מסך?  
 אם כן – באיזו מהנקודות A, B או C צריכה להימצא העין (על פי כיווני ההסתכלות שלה המתוארים בתרשים) כדי לראות את הדמות I?  
 אם לא – היעזר בתרשים ב', והסבר מדוע אי-אפשר לראות את הדמות ללא מסך.

ה. בתרשים ג' שלפניך מתואר חתך של עדשה קמורה-קעורה דקה עשויה מזכוכית. מטיילים על העדשה פעמיים אלומת אור מקבילה ואופקית, המתפשטת באוויר:

במקרה i אלומת האור פוגעת תחילה במשטח הקמור.  
 במקרה ii אלומת האור פוגעת תחילה במשטח הקעור.



העתק למחברתך את המספר של המשפט הנכון מבין המשפטים i-iv שלפניך:

- i. העדשה מרכזת את האור בשני המקרים.
- ii. העדשה מרכזת את האור במקרה i ומפזרת אותו במקרה ii.
- iii. העדשה מפזרת את האור במקרה i ומרכזת אותו במקרה ii.
- iv. העדשה מפזרת את האור בשני המקרים.

#### 24 בגרות 2007 שאלה 2

- על ספסל אופטי המונח על שולחן, מציבים מקור אור שצורתו מלבן (מלבן מלא).  
 עדשה מרכזת שרוחק המוקד שלה הוא:  $f = 30\text{cm}$ , ומסך.  
 מקור האור, העדשה והמסך מקבילים זה לזה.  
 שתיים מהצלעות של מקור האור המלבני מאונכות לשולחן. הדמות של מקור האור מתקבלת על המסך, וגובהה גדול פי 2 מהגובה של מקור האור.
- א. חשב את המרחק של מקור האור מן העדשה.
  - ב. פי כמה גדול שטח הדמות מהשטח של מקור האור? נמק.
  - ג. מציבים את מקור האור במרחק  $160\text{cm}$  מן המסך.
- באיזה מרחק ממקור האור יש להציב את העדשה, כדי שתתקבל על המסך דמות חדה שלו? אם יש יותר מאפשרות אחת, כתוב את כולן.

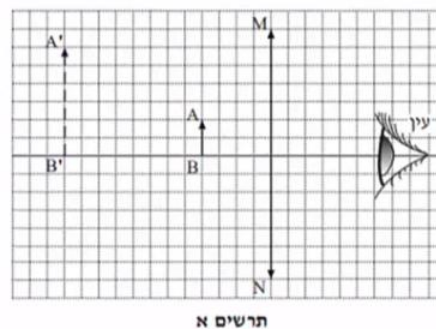
האיור שלפניך הוא העתק של תצלום שבו מראה מישורית המונחת על לוח עץ, ופנס הפנס פולט אלומת אור הפוגעת בלוח העץ ובמראה שעליו. מלבד הפנס אין מקורות אור נוספים.



ד. מדוע המראה שבתצלום נראית חשוכה, ואילו החלק של לוח העץ שבו פוגעת אלומת האור נראה מואר?

### 25) בגרות 2004 שאלה 1

בתרשים א' מוצגת מערכת, ובה עדשה מרכזת,  $MN$ , הציר האופטי שלה, בול דואר,  $AB$ , הדמות של הבול,  $A'B'$ , הנוצרת על ידי העדשה, ועין הצופה המתבונן בבול. אורך הצלע של כל משבצת בתרשים מייצג מרחק של 5 ס"מ במציאות.

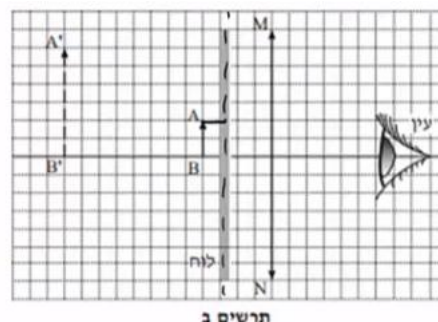


תרשים א

א. ענה על הסעיפים הבאים:

- i. מצא את אורך מוקד העדשה.
- ii. חשב את עוצמת העדשה. הצג את תשובתך בדיופטר.

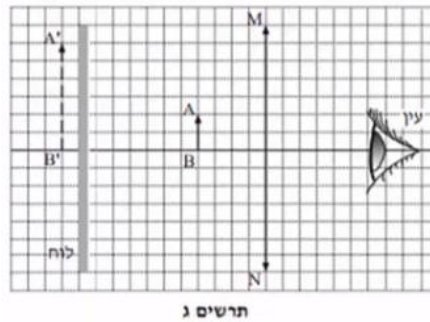
באותה מערכת מציבים לוח אטום לאור לפני הבול, בין הבול לעדשה (ראה תרשים ב').



תרשים ב

ב. האם במצב זה יוכל הצופה לראות את הבול? נמק.

את הלוח האטום לאור מעבירים אל מאחורי הבול, כמוצג בתרשים ג'.



ג. האם במצב זה יוכל הצופה לראות את הבול? נמק.

ד. מסלקים את הלוח האטום. הבול, העדשה והעין נשארים במקומם. הצופה מתבונן בבול דרך העדשה (ראה תרשים א'), ואחר כך הוא מסלק את העדשה ומתבונן בבול.

באיזה משני המצבים (עם העדשה או בלי העדשה) הבול נראה לצופה גדול יותר? הסבר את תשובתך במונחים של זוויות ראייה.

ה. העתק למחברתך את תרשים א'. (כל משבצת בתרשים תהיה משבצת במחברת). סרטט קרן, המופצת מראש הבול (A), עוברת בעדשה, וחודרת למרכז האישון של עין הצופה.

תאר כיצד קבעת את מהלך הקרן שסרטטת.

## תשובות סופיות:

- 1 א. ראה סרטון. ב. i. 6m . ד. ראה סרטון. ג. 2.4m . ii. 6m .
- 2 א.  $t = 1.28 \text{ sec}$  . ב.  $t \approx 8\frac{1}{3} \text{ min}$  . ג.  $t = 10^{-9}$  . ד.  $9.47 \cdot 10^{15} \text{ m}$  .
- 3 א. ראה סרטון. ב. ראה סרטון. ג. כן. ד. 0.85m .
- 4 א. ראה סרטון. ב. ראה סרטון. ג. כן. ד. 0.85m .
- 5 2.43m .
- 6 א.  $26.3^\circ$  . ב. ראה סרטון.
- 7 א. לא. ב.  $\sin \theta_2 = \frac{n_1}{n_2} \cdot \sin \theta_1$  . ג. ראה סרטון. ד. 1.353 .
- 8 א. ראה סרטון. ב. ראה סרטון. ג. הפוכה, מוגדלת, ממשית. ד. ראה סרטון.
- 9 א. ראה סרטון. ב. ראה סרטון. ג. לא. ד. כן.
- 10 א. ראה סרטון. ב. i.  $V = 24 \text{ cm}$  . ג. הפוכה, מוגדלת, ממשית. ד. ראה סרטון. ii.  $H_i = 8 \text{ cm}$  .
- 11 א. ראה סרטון. ב. i.  $V \approx 6.5 \text{ cm}$  . ג. לא. ד. כן. ii.  $H_i \approx 7.95 \text{ cm}$  .
- 12 א. i.  $V = -4.4 \text{ cm}$  . ב. ראה סרטון. ג. ראה סרטון. ד. כן. ii.  $H_i = 2.2 \text{ cm}$  . iii. מדומה, מוקטנת, ישרה.
- 13 א. ראה סרטון. ב. ראה סרטון. ג.  $h = 0.6 \text{ m}$  .
- 14 א. ראה סרטון. ב. 1.85 . ג. נמוך יותר.
- 15 א. i. ישרה. ב. ראה סרטון. ג. ראה סרטון. ד.  $V = 4 \text{ cm}$  ,  $H_i = 2 \text{ cm}$  , כן. ii. מדומה. iii. מוקטנת. ב. מפזרת.
- 16 א. החזרה מסודרת, מתקבלת דמות במפגש הקרניים המוחזרות. ב. 1.5sec . ג. IV .
- 17 א. לעבר המפה. ב. ראה סרטון. ג. כל משטח מתפקד כמראה עצמאית. ד. דמות 1 .
- 18 א. ראה סרטון. ב.  $\theta_c = 23.2^\circ$  . ג. ראה סרטון.
- 19 א. ראה סרטון. ב.  $r = 1.14 \text{ m}$  . ג. ראה סרטון. ד.  $x = 2.28 \text{ m}$  .
- 20 א. דמות ממשית – מתקבלת במפגש המשכי הקרניים הממשיות. ב. תרשים ב'. ג. 50cm . ד.  $u = 27.3 \text{ cm}$  .

- (21) א. 1. קרניים שיצאו מהסוף, 2. ההחזרה מהמשטח תהיה מסודרת.  
 ב. הצופה יימצא בשדה בראייה של הדמות. ג. כן. ד.  $2m$ .  
 ה. לא.
- (22) א. הדמות לא יכולה להיווצר בעדשה מפזרת. ב. ראה סרטון.  
 ג.  $4cm$ . ד.  $u > f$ . ה.  $u_2 = 8cm$ .
- (23) א. ראה סרטון. ב.  $15.1cm$ . ג. ראה סרטון.  
 ד. כן. ה. i.
- (24) א.  $u = 45cm$ . ב. פי 4. ג.  $u_1 = 120cm, u_2 = 40cm$ .  
 ד. ראה סרטון.
- (25) א. i.  $f = 30cm$ . ii.  $C = 3.33D$ . ב. לא. ג. כן.  
 ד. ראה סרטון. ה. ראה סרטון.

# יסודות הפיזיקה ב (20114)

פרק 7 - גלים

תוכן העניינים

56 ..... 1. גלים והתאבכות גלים

## גלים והתאבכות גלים:

**רקע:**

מהירות גל מחזורי:  $v = \lambda f$

חוק השבירה:  $\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2}$

גל עומד במיתר שקצותיו קשורים:  $\ell = n \frac{\lambda}{2}$

קווי מקסימום ראשיים בהתאבכות משני מקורות (ויותר) שווי-מופע:

$$\sin \theta_n = \frac{X_n}{L_n} = n \frac{\lambda}{d}$$

קווי מינימום בהתאבכות משני מקורות שווי-מופע:  $\sin \theta_n = \frac{X_n}{L_n} = \left(n - \frac{1}{2}\right) \frac{\lambda}{d}$

נוסחת יאנג:  $\frac{\Delta X}{L} = \frac{\lambda}{d}$

קווי מקסימום בהתאבכות בסריג עקיפה:  $\sin \theta_n = n \frac{\lambda}{d} = nN \cdot \lambda$

קווי צומת בעקיפה בסדר יחיד:  $\sin \theta_n = \frac{X_n}{L_n} = n \frac{\lambda}{w}$

$$\frac{I_a}{I_0} = 10^{\left(\frac{\alpha}{10}\right)}$$

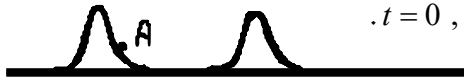
$$\frac{I_a}{I_b} = 10^{\left(\frac{\alpha-\beta}{10}\right)}$$

$$E = I \cdot S \cdot t$$

## שאלות:

## (1) תרגול גל 1

פולס נע ימינה בחבל.

מתוארת צורתו בשני זמנים שונים:  $t = 0$ ,  $t = 2 \text{ sec}$ .

א. מה משרעת הפולס?

ב. מה מהירות התקדמותו?

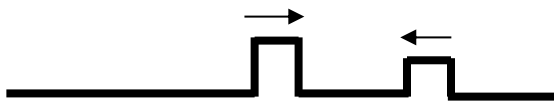
ג. מה כיוון תנועת החלקיק בחבל שנמצא בנקודה A ברגע  $t = 0$ ?

ד. מה כיוון תנועת החלקיק בחבל שנמצא בנקודה B ברגע זה?

## (2) תרגול גל 2

מציירים בחבל שתי הפרעות כמתואר בתרשים:  $v = 10 \frac{\text{cm}}{\text{sec}}$ .

שרטט את החבל בזמנים הבאים:

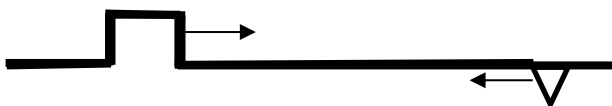
א.  $t = 8 \text{ sec}$ ב.  $t = 16 \text{ sec}$ ג.  $t = 18 \text{ sec}$ ד.  $t = 22 \text{ sec}$ 

## (3) תרגול גל 3

בחבל מייצרים שתי הפרעות שונות בשני קצותיו שמתקדמות אחת לקראת

השנייה, כמתואר בתרשים:  $v = 0.5 \frac{\text{cm}}{\text{sec}}$ .

שרטט את צורת החבל בזמנים הבאים:

א.  $t = 8 \text{ sec}$ ב.  $t = 12 \text{ sec}$ ג.  $t = 13 \text{ sec}$ ד.  $t = 16 \text{ sec}$ 

## (4) תרגול גל 4

פולס משולש נע בחבל ומגיע לקצהו. שרטט את החבל + הפולס במקרים הבאים:

א. קצה החבל קשור לקיר.

ב. קצה החבל מולבש על טבעת חופשיה למנוע על פני ציר שעובר דרכה.

ג. קצה החבל קשור לחבל כבד יותר.

ד. קצה החבל קשור לחבל קל יותר.

**5) תרגול גל עומד**


חוט AB, שאורכו 1m, קשור בקצהו B למחולל תנודות, ובקצהו A למוט קבוע (ראה תרשים).  
 כאשר תלמיד מפעיל את מחולל התנודות, נוצר בחוט AB גל, שמוחזר מהקצה A.  
 התלמיד מגדיל ברציפות את תדירות מחולל התנודות ורושם את התדירויות בכל פעם שנוצר בחוט AB גל עומד.  
 תוצאות הניסוי רשומות בטבלה שלפניך:

$\frac{1}{\lambda} (\text{m}^{-1})$	$\lambda (\text{m})$	צורת הגל העומד	f - תדירות התנודות (Hz)
			24
			45
			67
			88

התייחס לנקודה B כנקודת צומת.

א. העתק את הטבלה למחברתך, ורשום בעמודה את אורך הגל  $\lambda$ , לכל אחד מארבעת הגלים העומדים שנוצרו בחוט?

ב. רשום בעמודה המתאימה בטבלה את הערך  $\frac{1}{\lambda}$  לכל אחד מארבעת הגלים, וסרטט גרף של התדירות f כפונקציה של  $\frac{1}{\lambda}$ .

ג. מצא בעזרת הגרף את מהירות התפשטותו של גל בחוט AB.

ד. התלמיד ממשיך להגדיל את תדירות מחולל התנודות.

מהי התדירות הראשונה (הגבוהה מ-88Hz) שיווצר בה גל עומד בחוט AB? נמק.

**6) תרגול גל מחזורי 1**

מופיעים לפניכם גרפי העתק זמן והעתק מקום של חבל מסוים.

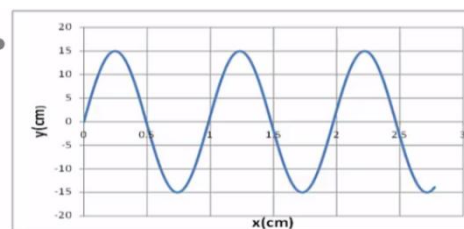
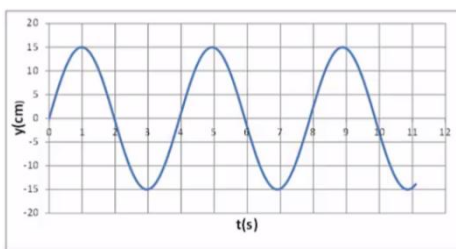
א. מהי משרעת הגל?

ב. מהו אורך הגל המתקדם בחבל?

ג. מה זמן המחזור של הגל?

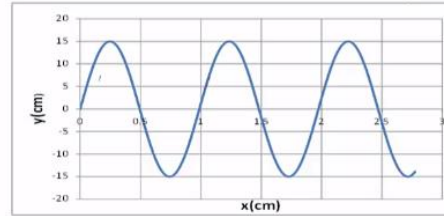
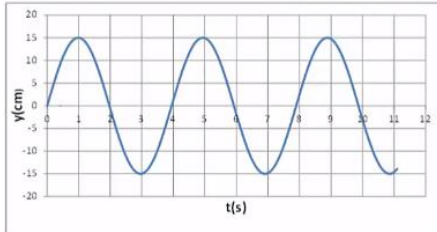
ד. מה מהירות הגל?

ה. לאיזה נקודה/נקודות בחבל יכול להתאים גרף ההעתק זמן (השמאלי)?



**תרגול גל מחזורי 2 (7)**

לפניכם גרף העתק-מקום והעתק-זמן של הגוף מהשאלה הקודמת.  
מכפילים את תדירות מחולל הגלים (מקור).  
שרטטו את גרף העתק-זמן והעתק-מקום החדשים.

**תרגול גל מחזורי 3 (8)**

- לפניך שני תצלומים (נראים זהים). הימני: גל מתקדם, השמאלי: גל עומד בקהל.  
א. קבע את אורך הגל של כל אחד מהגלים בחבל.  
ב. שרטט את החבל  $\frac{1}{4}$  זמן מחזור לאחר תצלום זה.  
ג. שרטט את החבל  $\frac{1}{2}$  זמן מחזור לאחר תצלום זה.  
ד. בחר בכל תצלום נקודה מימין ומשמאל למשרעת, וצייר את כיוון תנועתה מיד לאחר צילום זה.

**תרגיל 1 (9)**

מהירות גל במיתר מתוח 25 מטר בשנייה. קושרים את היתר בין שני כנים שהמרחק ביניהם 3 מטר.  
מניעים את המיתר בעזרת מתנד.  
באיזו תדירות יש לנדנד אותו כך שייווצר בו גל עומד עם 12 נקודות צומת (כולל הקצוות)?

- א. 45.8 הרץ.  
ב. 70 הרץ.  
ג. 8.3 הרץ.  
ד. 75 הרץ.  
ה. 80.7 הרץ.

**(10) תרגיל 2**

מיתר בעל אורך 90 ס"מ קשור בשני קצותיו. כשמנדנדים אותו בתדירות 150 הרץ, נוצר בו גל עומד עם 8 נקודות צומת (כולל הקצוות). מהירות גל במיתר הנ"ל:

א.  $15.3 \frac{\text{m}}{\text{sec}}$

ב.  $38.6 \frac{\text{m}}{\text{sec}}$

ג.  $17 \frac{\text{m}}{\text{sec}}$

ד.  $34.3 \frac{\text{m}}{\text{sec}}$

**(11) תרגיל 3**

מנדנדים מיתר מתוח הקשור בשני קצותיו בתדירות 100 הרץ. אורך המיתר 3 מטר. במיתר נוצר גל עומד עם 5 נקודות צומת (כולל הקצוות). מהי מהירות הגל במיתר?

א.  $150 \frac{\text{m}}{\text{sec}}$

ב.  $100 \frac{\text{m}}{\text{sec}}$

ג.  $330 \frac{\text{m}}{\text{sec}}$

ד.  $20 \frac{\text{m}}{\text{sec}}$

ה.  $340 \frac{\text{m}}{\text{sec}}$

**(12) תרגיל 4**

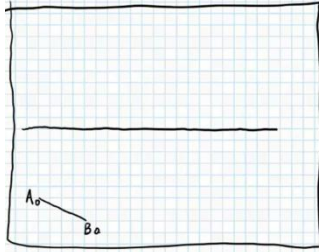
מיתר של גיטרה משמיע עם הפריטה עליו צליל בתדירות של 300 הרץ. אם רוצים להפיק מהמיתר צליל בעל תדירות של 900 הרץ:

- א. אין כל דרך להפיק את התדירות הנ"ל מהמיתר.
- ב. יש להקטין את המתיחות במיתר פי 3.
- ג. יש לקצר את המיתר פי 3.
- ד. יש להאריך את המיתר פי 3.
- ה. יש להגדיל את המתיחות פי 2.

### 13) תרגיל החזרה גלים דו ממדיים

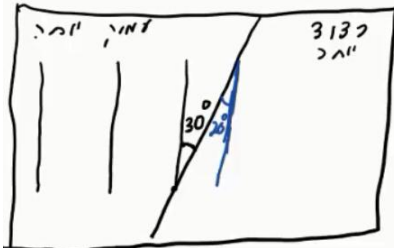
נתון אמבט הגלים הבא בו מתקדם גל ישר  $A_0B_0$ . באמבט קיים גם מחסום.

- הוסף לתרשים חץ המתאר את כיוון התקדמות הגל  $A_0B_0$ .
- הוסף לתרשים את חזית הגל לאחר שהוחזרה מהמחסום.
- הוסף לתרשים חיצים המתארים את זוויות פגיעת והחזרת הגל כפי שהן מוחזרות לאור.
- הוסף לתרשים חיצים המתארים את זוויות פגיעת והחזרת הגל כפי שהן מוחזרות לגלי מים.
- הוסיפו לתרשים את חזית הגל, ברגע שבו אמצע חזית הגל נוגעת במחסום.



### 14) תרגול מעבר תווך גלי מים

- נתון אמבט גלים בו נע גל לפי התרשים הבא. במרכז האמבט מוקם מחסום כך שגובה המים בחלק הימני נמוך יותר. מקור גלים בקצה השמאלי של האמבט מייצר גל ישר מחזורי בתדירות 4 הרץ. מהירות הגל במים בחלק העמוק היא 20 ס"מ לשנייה. הגל מתקדם ועובר לתווך הימני כמתואר בתרשים.
- מה מהירות גל המים בתווך הרדוד יותר?
  - מהו אורך הגל  $\lambda_1$  בחלק העמוק?
  - מהו אורך הגל  $\lambda_2$  בחלק הרדוד?
  - הוסיפו לתרשים (איכותית) עוד 2 אורכי גלים לאחר מעבר גל המים לתווך הרדוד.

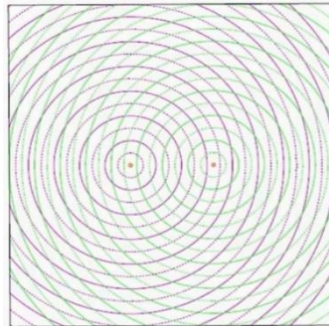


### 15) תרגול אנרגיה ומשרעת של גל

- גל מעגלי מתפשט באמבט גלים. משרעתו, כשהיה מעגל ברדיוס 3cm, הייתה 1cm.
- פי כמה תהיה קטנה האנרגיה שלו כשיתפשט לרדיוס של 15cm?
  - מה תהיה משרעתו במצב זה?

### 16) התאבכות גלי מים – תרגיל 1

נתון תרשים של אמבט גלים ובו 2 מקורות בעלי אורך גל זהה ושווי מופע.  
 קווים רציפים מייצגים שיא בגל וקווים מקווקוים – שפל.  
 זהו את קווי המקסימום והמינימום בתרשים.



### 17) התאבכות גלי מים – תרגיל 2

- נתון אמבט גלים בו 2 מקורות שהמרחק ביניהם 7 ס"מ.  
 המקורות מכים במים במופע זהה בתדירות 20 הרץ.  
 מהירות התקדמות הגלים באמבט היא 25 ס"מ לשנייה.  
 א. מה אורך הגל של הגלים שיוצרים המקורות?  
 ב. קבע, לגבי כל אחת מהנקודות הבאות: A, B, C, D בתרשים,  
 האם היא על קו מקסימום, על קו מינימום או נקי ביניים:
- i. A - מרחקה מהמקור הראשון - 4 ס"מ ומהמקור השני - 2.8 ס"מ.
  - ii. B - מרחקה מהמקור הראשון - 5 ס"מ ומהמקור השני - 3.2 ס"מ.
  - iii. C - מרחקה מהמקור הראשון - 7 ס"מ ומהמקור השני - 3.4 ס"מ.
  - iv. D - מרחקה מהמקור הראשון - 8 ס"מ ומהמקור השני - 6.5 ס"מ.
- ג. כמה קווי מקסימום וכמה קווי מינימום יופיעו באמבט?

### 18) שאלה 1 בהתאבכות גלי מים

שני מקורות גל זהים A ו-B נמצאים בנקודות  $(0,0)$  ו- $(6,0)$ . המקורות משדרים  
 באורך גל של 1cm לכל הכיוונים. על ציר y מתקבלת התאבכות בונה בנקודות  
 הבאות (המספרים בס"מ):

- א.  $(0,1.1)$   $(0,2.5)$   $(0,4.5)$   $(0,8)$   $(0,17.5)$ .
- ב.  $(0,1)$   $(0,2)$   $(0,4)$   $(0,8)$   $(0,16)$   $(0,32)$ .
- ג.  $(0,6)$   $(0,12)$   $(0,18)$   $(0,24)$   $(0,30)$ .
- ד.  $(4,4.5)$   $(4,8)$   $(4,17.5)$   $(3,2)$ .
- ה.  $(0,4.2)$   $(0,8.7)$   $(0,16.5)$   $(0,0)$ .
- ו.  $(0,4.5)$   $(0,8)$   $(0,17.5)$ .

**19) שאלה 2 בהתאבכות גלי מים**

- שני מקורות גל זהים ושווי מופע ממוקמים בנקודות  $(0,0)$  ו- $(5,0)$  (הערכים בס"מ). אורך הגל של כל אחד מהם 2 ס"מ. היכן על ציר  $y$  תתקבל התאבכות בונה מסדר ראשון? (הערכים בס"מ).
- א.  $(5,2.5)$ .  
 ב.  $(0,5.25)$ .  
 ג.  $(0,6)$ .  
 ד.  $(0,2.5)$ .  
 ה.  $(0,-5.25)$ .

**20) שאלה 3 בהתאבכות גלי מים**

- שני מקורות גל זהים A ו-B נמצאים בנקודות  $(0,5)$  ו- $(0,-5)$ . בנקודה  $(10,10)$  מתקבלת התאבכות בונה מסדר ראשון (כל המספרים נתונים בס"מ) אורך הגל הוא בקירוב:
- א. 8.5 ס"מ.  
 ב. 5 ס"מ.  
 ג. 7.3 ס"מ.  
 ד. 15 ס"מ.  
 ה. 6.8 ס"מ.

**21) שאלה 4 בהתאבכות גלי מים**

- באמבט גלים ממוקמים שני מתנדים בשתי נקודות  $(4,2)$  ו- $(7,6)$ . המתנדים רוטטים בתדירות זהה ובאותו מופע. בנקודה  $(10,10)$  מתקבלת התאבכות בונה מסדר שלישי. מהו אורך הגל? (הגדלים המספריים במטרים).
- א. 1.67m.  
 ב. 0.62m.  
 ג. 2.79m.  
 ד. 6.83m.  
 ה. 1.23m.

**(22) התאבכות אור תרגיל 1**

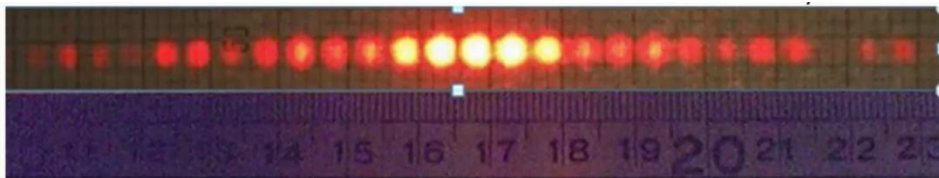
- מאירים בלייזר בעל אורך גל 500 ננומטר לוחית בעלת 2 סדקים בעלי  $d = 0.2\text{mm}$ . במרחק  $L = 3\text{m}$  נמצא מסך.
- מהו רוחב פס אור כל עוד אנחנו בזווית קטנות?
  - מהו מרחקו ממרכז התבנית של מרכז פס האור מסדר רביעי?
  - מהו מרחקו ממרכז תבנית ההתאבכות של קו החושך מסדר שביעי?
  - מה מרחקו ממרכז תבנית ההתאבכות של מרכז פס האור מסדר 200?

**(23) התאבכות אור תרגיל 2**

- מאירים בלייזר ירוק בעל אורך גל לא ידוע על לוחית ובה 2 סדקים שהמרחק ביניהם 0.15 מ"מ. מניחים מסך שאורכו  $h = 1\text{m}$  במרחק 3 מטר מהלוחית כך שמרכז המסך בדיוק מול הסדקים. הזווית למקסימום מסדר חמישי נמדדת ושווה ל-1 מעלה.
- מה אורך הגל של הלייזר?
  - מה מרחקו של המינימום מסדר חמישי ממרכז המסך?
  - כמה קווי חושך התקבלו על המסך?
  - אם נחליף המסך במסך ארוך מאוד שיונח באותו מיקום, כמה פסי אור ייווצרו על המסך?

**(24) התאבכות אור תרגיל 3**

- לוקחים לייזר אדום בעל אורך גל לא ידוע ומציבים לפניו לוחית בעלת 2 סדקים שהמרחק ביניהם 0.25 מ"מ. ממקמים מסך במרחק 1.8 מטר מהלוחית. על המסך מתקבלת תבנית ההתאבכות הבאה, לצד סרגל שהודבק למסך מראש.



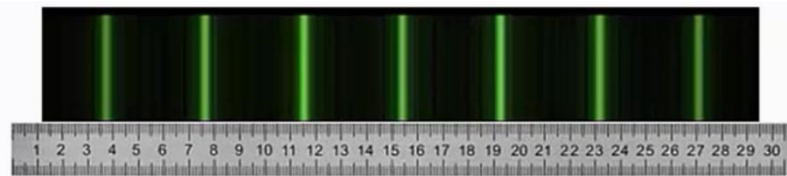
- מצא את אורך הגל של הלייזר בדרך המדויקת ביותר.
- איזה מהנקודות בצילום הינה נקודת המקסימום המרכזי?
- לאיזה נקודה בצילום מגיע אור שמרחקו מאחד הסדקים גדול ב-3 אורכי גל מאשר מרחקו מהסדק השני?
- לאיזה נקודה על המסך מגיע אור שמרחקו מאחד הסדקים גדול ב-4.5 אורכי גל מאשר מרחקו מהסדק השני?
- מהן 3 הדרכים אשר ניתן לצופף בהן את תבנית ההתאבכות?

**(25) התאבכות אור בסריג – תרגיל 4**

- מאירים בלייזר בעל אורך גל לא ידוע על סריג בעל קבוע של 100 חריצים למ"מ. מציבים מסך במרחק 1 מטר מהסריג כך שמרכזו מול מרכז הסריג ומול קרן הלייזר. אורך המסך 4 מטר.
- מיקומו של קו המקסימום הראשון נמדד ושווה ל-6.5 ס"מ ממרכז המסך.
- מהו אורך הגל של הלייזר?
  - מה מיקומו של קו המקסימום מסדר שני?
  - מה מיקומו של קו המקסימום מסדר חמישי?
  - כמה קווי מקסימום יתקבלו על המסך?
  - בהנחה שמחליפים מסך זה במסך ארוך מאוד באותו המיקום, כמה קווי מקסימום יתקבלו עליו?

**(26) התאבכות אור בסריג – תרגיל 5**

- מאירים בלייזר ירוק בעל אורך גל 550 ננומטר על סריג בעל קבוע לא ידוע, ומציבים מסך במרחק 2.5 מטר מהסריג.
- על המסך שעליו מודבק סרגל מתקבלת התמונה הבאה :



- מצאו את קבוע הסריג בדרך המדויקת ביותר.
- באיזה זווית ביחס לאנך האמצעי יתקבל קו המקסימום מסדר 20?
- מה יקרה לתבנית ההתאבכות אם נחליף את הלייזר הירוק בלייזר כחול?

**(27) התאבכות אור בסריג – תרגיל 6**

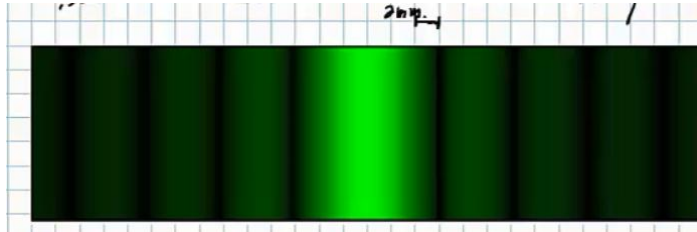
- אור לבן פוגע בסריג עקיפה בעל קבוע 300 חריצים למ"מ. מסך ארוך מונח במרחק 2 מטר מהסריג.
- מה רוחב הפס הצבעוני מסדר ראשון?
  - מה הזווית שנפתחת בין המקסימום האדום מסדר שני, והסגול מסדר שני?
  - הוכח שקיימת חפיפה בצבעים בין הסדר השני לסדר השלישי.

**(28) עקיפה מסדק יחיד – תרגיל 1**

- תלמיד מאיר בלייזר אדום בעל אורך גל 670 ננומטר סדק שרוחבו 0.3 מ"מ. תבנית עקיפה מתקבלת על מסך במרחק 1.5 מטר.
- מה רוחבו של המקסימום המרכזי?
  - מה רוחבו של מקסימום משני, מסדר נמוך?

**29) עקיפה מסדק יחיד – תרגיל 2**

לוקחים לייזר ירוק בעל אורך גל 530 ננומטר. מציבים אותו לפני סדק בעל רוחב לא ידוע, ועל מסך משבצות במרחק 3 מטר מהסדק מתקבלת תבנית ההתאבכות הבאה:

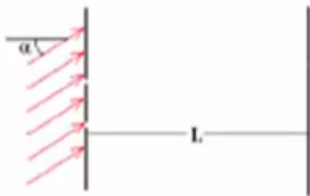


נתון שרוחב משבצת על הלוח הוא 2 מ"מ.

- מה רוחב הסדק?
- כמה קווי צומת יתקבלו על מסך ארוך מאוד?
- מה יקרה לתבנית ההתאבכות אם נגדיל את רוחב הסדק?

**30) שאלה בהתאבכות גלי אור**

דרך משטח מישורי עם שני סדקים צרים מאוד מעבירים גל מישורי בעל אורך גל  $\lambda$  המתקדם בכיוון היוצר זווית קטנה  $\alpha$  עם האנך למשטח (ראו ציור).



המרחק בין הסדקים הוא  $d$  כאשר  $d \gg \lambda$ . מודדים את העוצמה במרכז לוח מישורי הנמצא במרחק  $L \gg d$  מהמשטח עם הסדקים, כלומר בנקודה הנמצאת מול נקודת האמצע בין שני הסדקים. העוצמה הנמדדת היא 0.

מהי הזווית הקטנה ביותר  $\alpha$  המסבירה מדידה זו?

- $\alpha = 0$
- $\alpha = \frac{\lambda}{2d}$
- $\alpha = \frac{2\lambda}{\pi d}$
- $\alpha = \frac{2\lambda}{d}$
- $\alpha = \frac{2\pi\lambda}{d}$
- $\alpha = \frac{\lambda}{\pi d}$

**31) שאלה 2 בהתאבכות גלי אור**

שני גלים אלקטרומגנטיים העוברים כל אחד דרך סדק צר יוצרים תבנית התאבכות

על פני מסך רחוק. הגל העובר דרך הסדק הראשון מתואר ע"י:  $\vec{E}_1 = A_1 \cdot e^{i(kz - \omega t)} \hat{x}$ .

הגל העובר דרך הסדק השני מתואר ע"י:  $\vec{E}_2 = A_1 \cdot e^{i(kz - \omega t)} (-\hat{y})$ .

היחס בין העוצמה המקסימלית לעוצמה המינימלית הוא:

א.  $\sqrt{2}:1$ .

ב.  $1:0$ .

ג.  $1:1$ .

ד.  $2:1$ .

ה.  $4:1$ .

ו.  $3:2$ .

**32) שאלה 1 – גלי קול**

אם נניח, כי עוצמת סף השמע היא:  $10^{-16} \frac{W}{cm^2}$ .

מהי העוצמה ביחידות הנ"ל בסף הכאב 140dB (כלומר, כמה  $\frac{W}{cm^2}$  יש ב-140dB)?

א.  $14 \cdot 10^{-16} \frac{W}{cm^2}$ .

ב.  $10^{-14} \frac{W}{cm^2}$ .

ג.  $140 \frac{W}{cm^2}$ .

ד.  $10^4 \frac{W}{cm^2}$ .

ה.  $10^{-2} \frac{W}{cm^2}$ .

**33) שאלה 2 – גלי קול**

פי כמה גדולה עוצמת קול של 100 דציבל מעוצמת קול של 10 דציבל?

א. פי 10.

ב. פי 100.

ג. פי 1,000.

ד. פי 10,000.

ה. פי 1,000,000.

ו. פי 1,000,000,000.

ז. פי 10,000,000,000.

### 34) שאלה 3 – גלי קול

אם עוצמת הקול המינימאלית שבני אדם מסוגלים לשמוע (סף השמע)

היא:  $10^{-16} \frac{W}{cm^2}$ , מהי עוצמת הקול באותן יחידות ב-130 דציבל (סף הכאב),

וכמה אנרגיה פוגעת בעור התוף החשוף לעוצמה הזו (130dB) במשך שעה? נתון ששטחו של עור התוף כ-0.7 סמ"ר.

א. העוצמה:  $10^{-13} \frac{W}{cm^2}$ , וסה"כ אנרגיה בשעה: 5.3J.

ב. העוצמה:  $10^{-3} \frac{W}{cm^2}$ , וסה"כ אנרגיה בשעה: 5.3J.

ג. העוצמה:  $130 \frac{W}{cm^2}$ , וסה"כ אנרגיה בשעה: 75J.

ד. העוצמה:  $1.3 \cdot 10^{-3} \frac{W}{cm^2}$ , וסה"כ אנרגיה בשעה: 2.52J.

ה. העוצמה:  $0.001 \frac{W}{cm^2}$ , וסה"כ אנרגיה בשעה: 2.52J.

### 35) שאלה 4 – גלי קול

אם נניח כי עוצמת סף השמע היא:  $10^{-16} \frac{W}{cm^2}$  (ווט לסמ"ר),

מהי העוצמה I ביחידות הנ"ל ב-120dB, וכמה אנרגיה E פוגעת בעור התוף של אוזנו של אדם, החשוף לעוצמת קול זו במשך 4 שעות? הניחו ששטחו של עור התוף 0.7 סמ"ר.

א.  $E = 5.8 \text{Joule}$  ו-  $I = 12 \cdot 10^{-16} \frac{W}{cm^2}$ .

ב.  $E = 5.8 \text{Joule}$  ו-  $I = 13 \cdot 10^{-14} \frac{W}{cm^2}$ .

ג.  $E = 1.01 \text{Joule}$  ו-  $I = 10^{-4} \frac{W}{cm^2}$ .

ד.  $E = 10.1 \text{Joule}$  ו-  $I = 10^{-4} \frac{W}{cm^2}$ .

ה.  $E = 1.2 \cdot 10^6 \text{Joule}$  ו-  $I = 120 \frac{W}{cm^2}$ .

**36) שאלה 5 – גלי קול**

כאשר אדם נחשף לקול בעוצמה של 20 דציבל בפרק זמן של שעה, כמות האנרגיה הכוללת המגיעה לעור התוף של אוזנו היא:  $2.5 \cdot 10^{-11}$  Joule. מהי כמות האנרגיה הכוללת המגיעה לעור התוף כאשר האוזן נחשפת לקול בעוצמה של 120 דציבל למשך זמן של 20 דקות?

א. 0.08Joule

ב. 0.75Joule

ג. 25Joule

ד.  $2.5 \cdot 10^{-5}$  Jouleה.  $5 \cdot 10^{-11}$  Joule**37) שאלה 6 – גלי קול**

כאשר אדם נחשף לקול בעוצמה של 20 דציבל בפרק זמן של שעה, כמות האנרגיה הכוללת המגיעה לעור התוף של אוזנו היא:  $2.5 \cdot 10^{-11}$  Joule. מהי כמות האנרגיה הכוללת המגיעה לעור התוף כאשר האוזן נחשפת לקול בעוצמה של 120 דציבל למשך זמן של 30 דקות?

א. 0.125Joule

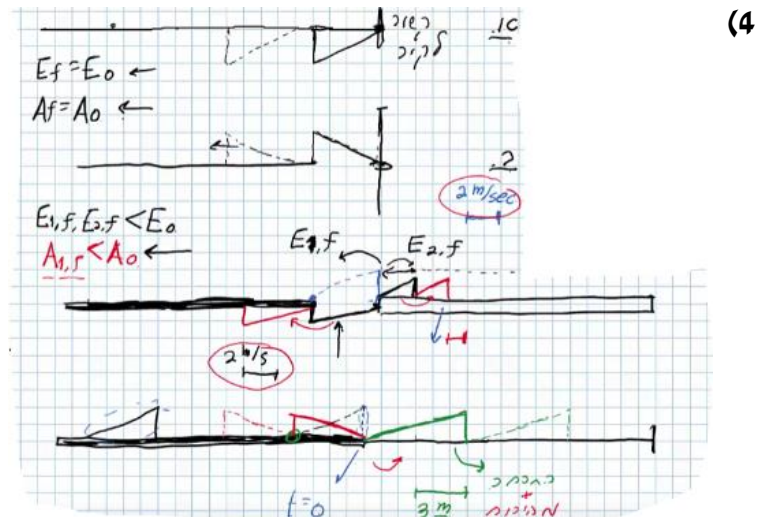
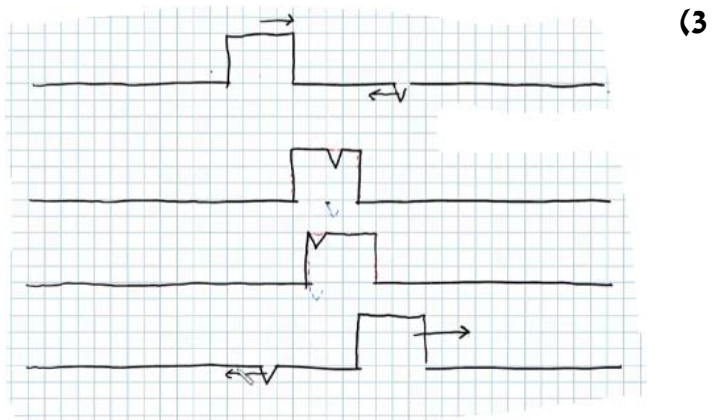
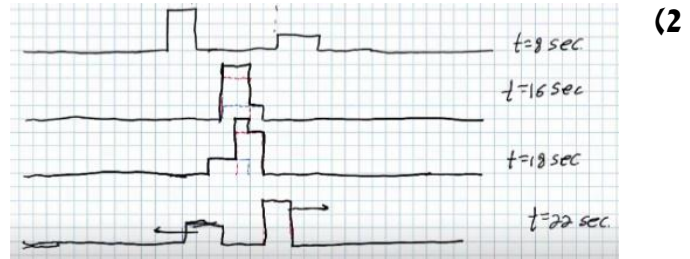
ב. 1.130Joule

ג. 37.52Joule

ד.  $3.8 \cdot 10^{-5}$  Jouleה.  $7.5 \cdot 10^{-11}$  Joule

**תשובות סופיות:**

(1) א.  $A = 0.3m$  ב.  $V = 0.2 \frac{m}{sec}$  ג. למעלה. ד. למטה.

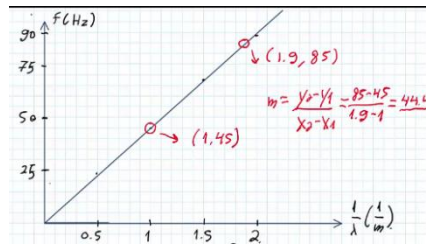


א. (5)

$\frac{1}{\lambda} \text{ (m}^{-1}\text{)}$	$\lambda \text{ (m)}$	צורת הגל העומד	f - תדירות התנודות (Hz)
0.5	2		24
1	1		45
1.5	$\frac{2}{3}$		67
2	$\frac{1}{2}$		88

ג.  $f = v \frac{1}{\lambda}$  . ד.  $f = 111 \text{ Hz}$

ב.



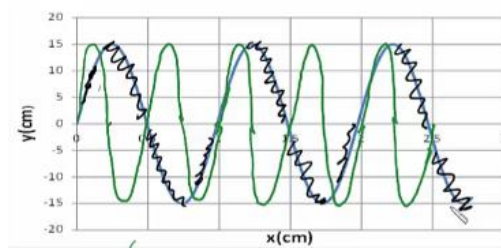
א.  $A = 0.15 \text{ m}$

ב.  $\lambda = 1 \text{ m}$

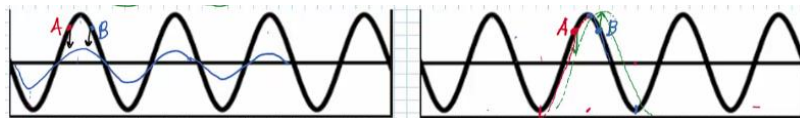
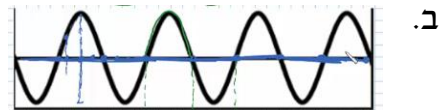
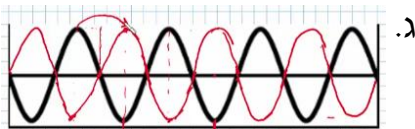
ג.  $t = 4$

ה.  $(0.5, 0)$ ,  $(1.5, 0)$ ,  $(2.5, 0)$

ז. הגל הירוק בשרטוט:



א. מתקדם:  $\lambda_1 = 80 \text{ cm}$ , עומד:  $\lambda_2 = 80 \text{ cm}$ .

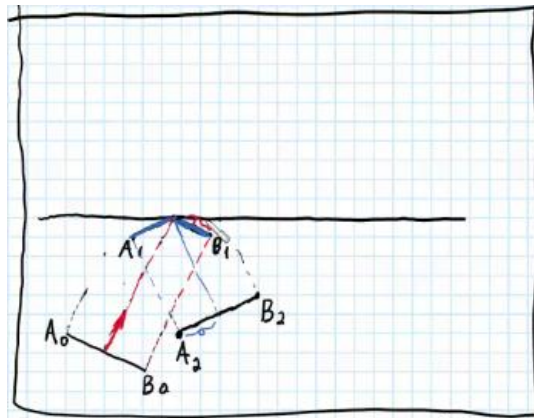


א. (9)

ב. (10)

א. (11)

ג. (12)

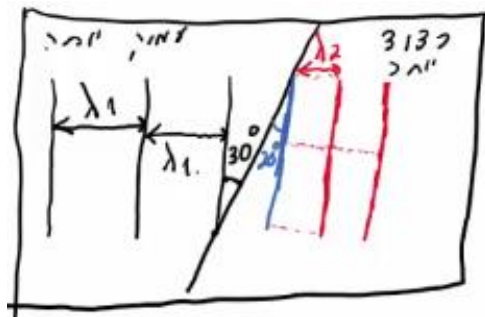


(13)

ג.  $\lambda_2 = 3.42\text{cm}$

ב.  $\lambda_1 = 5\text{cm}$

א.  $v_2 = 13.7 \frac{\text{cm}}{\text{sec}}$  (14)

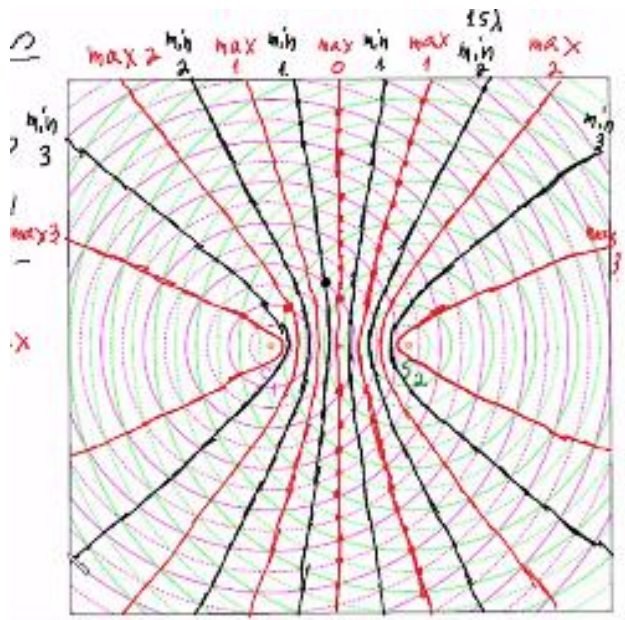


ד.

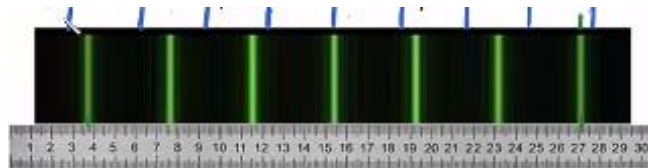
ב.  $0.45\text{cm}$

א. 5 (15)

(16)



- (17) א. 1.2 ס"מ.  
 ב.i. A - נקי מקסימום מסדר ראשון.  
 ב.ii. B - נקי צומת מסדר שני.  
 ב.iii. C - נקי מקסימום מסדר שלישי, נקי על קו מקסימום.  
 ב.iv. D - נקי ביניים.  
 ג. 11 קווי מקסימום, 12 קווי מינימום.  
 (18) א' מלאה ו-ו' חלקית.  
 (19) ב' ו-ה.  
 (20) ה.  
 (21) א'.
- (22) א. 7.5 nm    ב. 3 ס"מ.    ג.  $\theta = 0.93^\circ$     ד.  $x_{200} = 1.73$   
 (23) א. 524 נ"מ.    ב. 4.72 ס"מ.    ג. 94 קווי חושך.    ד. 573 פסי מקסימום.  
 (24) א. 5 מ"מ.    ב.  $\lambda = 694$     ג.  $3\lambda$     ד.  $4.5\lambda$     ה. ראה סרטון.  
 (25) א. 649 נ"מ.    ב. 13 ס"מ.    ג. 34.3 ס"מ.    ד. 27 קווים.    ה. 31 קווים.  
 (26) א.  $282 \frac{\text{haritsim}}{\text{cm}}$     ב.  $18.1^\circ$



- (27) א. 0.188 מ'.    ב.  $10.9^\circ$     ג. הוכחה.  
 (28) א. 6.7 מ"מ.    ב. 3.35 מ"מ.  
 (29) א. 0.265 מ"מ.    ב. 1,000 קווי צומת בתבנית.  
 ג. האור ינוע בקווים ישרים ולא מבצע עקיפה.  
 (30) ב'.  
 (31) ג'.  
 (32) ה.  
 (33) ו'.  
 (34) ה.  
 (35) ג'.  
 (36) א'.  
 (37) א'.

# יסודות הפיזיקה ב (20114)

פרק 8 - סמפרטורה התפשטות תרמית וחוק הגז האידיאלי

תוכן העניינים

1. הרצאות ותרגילים ..... 74

## הרצאות ותרגילים:

### שאלות:

#### (1) דוגמה-טמפרטורה שווה

- א. גוף נמצא בטמפרטורה של  $37^{\circ}\text{C}$ .  
 מה הטמפרטורה של הגוף בפרנהייט?  
 ב. מודדים את הטמפרטורה של גוף פעם אחת בצלזיוס ופעם אחת בפרנהייט ומקבלים שכמות הערך הנמדד זהה (כלומר אותו מספר בצלזיוס ובפרנהייט).  
 מהי טמפרטורת הגוף?

#### (2) דוגמה-גשר ברזל

- מוטות הברזל שתומכות בגשר הן באורך של 80 מטר כאשר הטמפרטורה היא 20 מעלות צלזיוס.  
 אם הטמפרטורות בסביבה בו מציבים את הגשר נעות בין  $10^{\circ}\text{C}$  ל- $50^{\circ}\text{C}$  מה האורך המקסימאלי והמינימלי של המוטות?

#### (3) דוגמה-טבעת על מוט

- הקוטר של מוט ברזל הנמצא ב- $20^{\circ}\text{C}$  הוא 5.50cm.  
 רוצים להלביש טבעת, העשויה ברזל גם כן, על המוט.  
 קוטר הפנימי של הטבעת ב- $20^{\circ}\text{C}$  הוא 5.48cm.  
 לאיזה טמפרטורה צריך לחמם את הטבעת אם נרצה שקוטר הפנימי יהיה ב-0.005cm גדול מזה של המוט?

#### (4) דוגמה-מיכל מים

- מיכל בצורה של גליל ברדיוס 20cm ובגובה 60cm עשוי מזכוכית רגילה.  
 ממלאים את המיכל במים בבוקר כאשר הטמפרטורה היא  $15^{\circ}\text{C}$  (ניתן להניח שזו טמפי המיכל והמים).  
 כמה מים ישפכו עד השעה 14:00 בה הטמפי היא  $40^{\circ}\text{C}$ ?  
 הזנח איבוד מים הנגרם מאידוי.

#### (5) דוגמה-בלון הליום

- א. מהי המסה האטומית של אטום הליום (He) בעל שני פרוטונים ושני נויטרונים?  
 ב. חשב את המסה המולקולרית של הליום?  
 ג. כמה מולים יש בבלון המכיל 50 גרם הליום?  
 ד. כמה אטומים של הליום יש בבלון?

**6) דוגמה-ערבוב הליום עם מימן**

ערבבו 50 מול של מימן עם 30 מול של הליום 4.  
 מהי מסת החומר לאחר הערבוב?

**7) דוגמה-בקבוק מים**

בקבוק מים מכיל 2 ליטר מים. הנח שצפיפות המים היא:  $1\text{k} \frac{\text{g}}{\text{L}}$ .

- חשב את המסה המולקולרית של מים ( $\text{H}_2\text{O}$ ).
- כמה מולים של מים יש בבקבוק?
- הצליחו לפרק כל מולקולה בבקבוק לשני אטומים של מימן ואטום של חמצן.
- כמה מולים של מימן וכמה מולים של חמצן יש בבקבוק?

**8) דוגמה-חנקן דו חמצני**

- חנקן דו חמצני ( $\text{NO}_2$ ) מורכב מאטום חנקן ושני אטומי חמצן.  
 רוצים להכין 50 מול של חנקן דו חמצני ע"י ערבוב של מיכל המכיל חמצן ( $\text{O}_2$ ) בלבד ומיכל המכיל חנקן בלבד.
- כמה מולים צריכים להיות בכל מיכל לפני הערבוב?
  - כמה מולים היו צריכים להיות במיכל החמצן אם חמצן היה גז חד אטומי (כלומר כל חלקיק בגז היה מורכב מאטום יחיד של חמצן)?
  - מהי מסת החמצן ומהי מסת החנקן לפני הערבוב?

**9) דוגמה-מחממים גז במיכל סגור**

גז מוחזק במיכל ברזל סגור בלחץ של 1atm ובטמפ' של  $25^\circ\text{C}$ .  
 מחממים את המיכל לטמפ' של  $100^\circ\text{C}$ .  
 מה יהיה הלחץ של הגז במיכל?

**10) דוגמה-נפח של מול ב-STP**

מצא מהו הנפח של מול אחד של גז כלשהו ב-STP?

**11) מנפחים בלון**

- מנפחים בלון בגז הליום עד אשר הוא מגיע לנפח של 2L ב-STP.
- מהו מספר המולים של הליום שהוכנסו לבלון?
  - מהי מסת הגז שהוכנסה לבלון?
  - מהי התשובה לסעיף א' אם הטמפרטורה היא טמפרטורת החדר (בערך  $27^\circ\text{C}$ ).

**(12) לחץ בצמיג**

מנפחים צמיג לפני נסיעה ללחץ של  $32 \text{ psi}$  ( $1 \text{ psi} \approx 6,895 \text{ Pa}$ ) ביום בו הטמפרטורה היא  $27^\circ \text{C}$ . לאחר נסיעה ארוכה טמפרטורת הצמיג עולה כתוצאה מחיכוך עם הכביש ל- $60^\circ \text{C}$ .  
 מה יהיה הלחץ החדש בצמיג ב- $\text{psi}$ ?  
 (שים לב שהלחץ הנמדד בצמיג הוא ביחס ללחץ אטמוספרי).

**(13) דוגמה-מולקולות בנשימה**

הערך כמה מולקולות ישנם בנשימה אחת אם בערך נפח האוויר בנשימה הוא ליטר אחד.

**(14) סרט מדידה**

סרט מדידה עשוי מברזל, הסרט כויל בטמפרטורה של  $15^\circ \text{C}$ . מודדים עם הסרט ביום בו הטמפרטורה היא  $35^\circ \text{C}$ .  
 א. האם המדידה שיראה הסרט נמוכה או גבוהה מהאורך האמיתי?  
 ב. חשב את אחוז הטעות במדידה של הסרט.

**(15) צוללן מנפח ריאות**

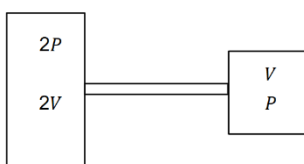
צוללן מנפח את הריאות לנפח מקסימלי של  $5 \text{ L}$  כאשר הוא  $7$  מטר מתחת לפני המים. מה יהיה נפח הריאות של הצוללן אם יעלה לפני המים ויחזיק את נשימתו עצורה?  
 הערה: לחץ בתוך מים גדל ב- $9.8 \text{ Pa}$  לכל מילימטר גובה (או עומק) מתחת לפני המים.

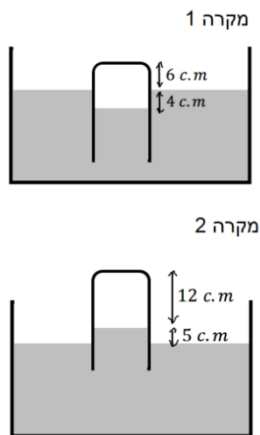
**(16) מתי למלא דלק**

הצפיפות של דלק ב- $0^\circ \text{C}$  היא:  $0.68 \cdot 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ .  
 א. מה הצפיפות של דלק ביום חם בו הטמפרטורה היא  $40^\circ \text{C}$ ?  
 ב. מה אחוז השינוי בצפיפות?  
 ג. אם מחיר הדלק נקבע לפי ליטרים (כלומר לפי הנפח) מתי עדיף למלא דלק ביום קר או חם?

**(17) שני מיכלים מחוברים בצינור**

שני מיכלים מלאים בגזים שונים ונמצאים באותה הטמפרטורה. נפח מיכל אחד הוא  $V$  והלחץ בו  $P$  ונפח המיכל השני הוא  $2V$  והלחץ בו  $2P$ . מחברים את המיכלים בצינור בעל נפח זניח. בעת הערבוב כל מולקולה ממיכל אחד מתרכבת עם מולקולה ממיכל 2 ונוצרת מולקולה אחת חדשה (לא כל המולקולות במיכל 2 מתרכבות).  
 מה הלחץ במיכלים לאחר החיבור בהנחה כי הטמפרטורה לא משתנה? (הבא תשובתך באמצעות  $P$ ).



**18) צינורית במיכל כספית**

מיכל גדול מאוד מכיל כספית ונמצא בחדר לחץ בו לחץ האוויר אינו ידוע. טובלים במיכל צינורית זכוכית דקה הסגורה בחלקה העליון. כאשר מחזיקים את הקצה העליון של הצינורית בגובה 6 ס"מ מעל פני הכספית במיכל, גובה הכספית בצינורית הוא 4 ס"מ מתחת לפני הכספית במיכל. כאשר מחזיקים את הקצה העליון של הצינורית בגובה 17 ס"מ מעל פני הכספית במיכל, גובה הכספית בצינורית הוא 5 ס"מ מעל לפני הכספית במיכל. הנח שגובה פני הכספית במיכל קבוע.

א. מהו לחץ האוויר בחדר?

ב. באיזה גובה צריך להחזיק את קצה הצינורית מעל המיכל כך שפני הכספית בצינורית יהיו בגובה הכספית של המיכל?

## תשובות סופיות:

- (1) א.  $98.6^{\circ}\text{F}$  ב.  $-40^{\circ}\text{C}$
- (2)  $l_{\max} = 80.0288_{\text{m}}$  ,  $l_{\min} = 79.9712_{\text{m}}$
- (3)  $T = 400^{\circ}\text{C}$
- (4)  $V = 0.3563 \cdot \text{c.m}^3$  מים שנשפכו.
- (5) א.  $m_a \approx 4_u$  ב.  $M = 4_{\text{gr}}$  ג.  $12.5_{\text{mol}}$  ד.  $7.53 \cdot 10^{24}$  אטומים
- (6)  $170_{\text{gr}}$
- (7) א.  $18_u$  ב.  $11_{\text{mol}}$  ג.  $111_{\text{mol}}$  חמצן ,  $222_{\text{mol}}$  מימן
- (8) א.  $50_{\text{mol}}$  חמצן ,  $50_{\text{mol}}$  חנקן ב.  $100_{\text{mol}}$  חמצן ג.  $0.7_{\text{kg}}$  חנקן ,  $1.6_{\text{kg}}$  חמצן
- (9)  $\approx 1.25_{\text{atm}}$
- (10)  $\approx 22.4_{\text{L}}$
- (11) א.  $0.0892_{\text{mol}}$  ב.  $0.359_{\text{gr}}$  ג.  $0.0812_{\text{mol}}$
- (12)  $\approx 37_{\text{psi}}$
- (13)  $\approx 2.45 \cdot 10^{22}$
- (14) א. נמוכה ב.  $0.024\%$
- (15)  $\approx 8.42_{\text{L}}$
- (16) א.  $0.655 \cdot 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$  ב.  $\approx 3.68\%$  ג. ביום קר
- (17) א.  $\frac{4}{3}p$
- (18) א.  $0.656_{\text{atm}}$  ב.  $10.8_{\text{c.m}}$

# יסודות הפיזיקה ב (20114)

פרק 9 - האטום - התפתחות הסטורית ומודל האטום של בוהר

תוכן העניינים

1. הסבר ותרגילים.....79

## הסבר ותרגילים:

### רקע:

#### הנחות בוהר:

$$m_e v_n r_n = n \frac{h}{2\pi}$$

$$E_{ph} = |E_f - E_i|$$

#### רמות אנרגיה באטום מימן:

$$E_n = -\frac{R^*}{n^2} \quad (U_\infty = 0)$$

$$R^* = \frac{2\pi^2 k^2 m_e e^4}{h^2} = \frac{m_e e^4}{8\epsilon_0^2 h^2} = 13.6 eV$$

#### רדיוסי המסלולים המותרים של האלקטרון באטום מימן:

$$r_n = r_1 n^2$$

$$r_1 = \frac{h^2}{4\pi^2 m_e k e^2} = 0.529 \text{ \AA}$$

### שאלות:

#### (1) תרגיל 1 אטום מימן

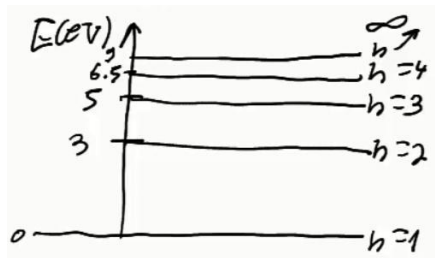
- איזו אינטראקציה תתרחש בין גז מימן ברמת היסוד ובין:
- אלקטרונים בעלי אנרגיה קינטית של 12 אלקטרון וולט?
  - פוטונים בעלי אנרגיה של 12 אלקטרון וולט?
  - פוטונים בעלי אנרגיה של 15 אלקטרון וולט?
  - אלקטרונים בעלי אנרגיה קינטית של 15 אלקטרון וולט?
- היעזרו בדיאגרמה לרמות אנרגיה של אטום מימן.

#### (2) תרגיל 2 אטום מימן

- בניסוי מסוים העבירו דרך גז מימן חד אטומי ברמת היסוד אלקטרונים שהואצו לאנרגיה קינטית של 13 אלקטרון וולט.
- כיצד ייראה ספקטרום הפליטה של גז זה?
  - מה הערכים האפשריים של האנרגיה הקינטית לאלקטרונים שהואצו לאחר מעברם בגז?
  - מה השינוי ברדיוס של האלקטרונים הקשורים שעוררו לרמה הגבוהה ביותר?

**(3) תרגיל 3 אטום מימן**

- בניסוי נוסף הקרינו גז מימן ברמת היסוד בפוטונים בעלי אורך גל גדול ושווה מ-100 ננומטר, וקטן או שווה מ-400 ננומטר.
- איך ייראה ספקטרום הבליעה של הגז?
  - איך ייראה ספקטרום הפליטה של הגז?
  - מהי האנרגיה הקינטית של האלקטרון האנרגטי ביותר?

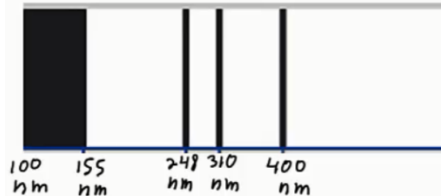
**(4) גזים אחרים תרגיל 1**

- נתונה דיאגרמת רמות האנרגיה של גז מסוים:
- איזו אינטראקציה תתרחש אם נקרין את הגז בפוטונים בעלי אנרגיה של 6 אלקטרון וולט?
  - איזו אינטראקציה תתרחש אם נאיץ אל הגז אלקטרונים בעלי אנרגיה קינטית של 6 אלקטרון וולט?
  - במידה ותתרחש אינטראקציה עם הגז, תאר מה יקרה לאחר מכן.

**5) גזים אחרים תרגיל 2**

מעבירים דרך גז לא ידוע אור בטווח אורכי גל של:  $180\text{nm} \leq \lambda \leq 700\text{nm}$ .  
מקבלים ספקטרום בליעה בו חסרים 3 אורכי גל:  $\lambda_1 = 620\text{nm}$ ,  $\lambda_2 = 400\text{nm}$ ,  
 $\lambda_3 = 248\text{nm}$ .

- חשבו ושרטטו את דיאגרמת רמות האנרגיה של גז זה.
- כמה קווים ספקטרליים יהיו בספקטרום הפליטה במצב המתואר למעלה?
- מאיצים אלקטרונים במתח של 5.5 וולט ולאחר מכן מכוונים אותם לתוך גז זה שנמצא מחדש ברמת היסוד.  
עם איזה אנרגיה קינטית יכולים האלקטרונים החופשיים להמשיך לאחר מעברם בגז?

**6) גזים אחרים תרגיל 3**

בניסוי מסוים הוקרן גז לא ידוע באור בספקטרום רציף בתחום אורכי הגל של:  $100\text{nm} \leq \lambda \leq 500\text{nm}$ .  
ספקטרום הבליעה של הגז כולל 3 קווים

- דקים חשוכים, ותחום רציף חשוך כמתואר בתרשים.  
א. חשבו את הפרשי האנרגיה של 3 הרמות המעוררות האפשריות לחישוב ביחס לרמת היסוד.
- ענו על הסעיפים הבאים:
  - הסבירו מדוע קיימת בליעה רציפה -  $\lambda \leq 155\text{nm}$ .
  - חשבו את האנרגיה הדרושה ליינון אטום זה.
- שרטטו דיאגרמת רמות אנרגיה לאטום. בחרו את אנרגיית רמת היסוד כרצונכם.
- חשבו את אורכי הגל הנפלטים באטום זה.
- מה המהירות המקסימלית של אלקטרון שייפלט מאטום זה?

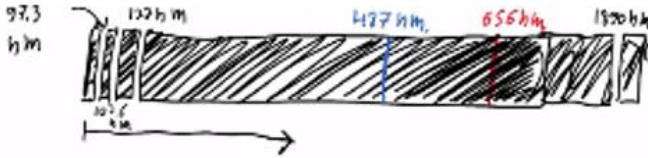
**7) אטומים דמויי מימן תרגיל**

- שרטטו את 5 רמות האנרגיה הראשונות של הליום דמוי מימן + רמת היינון.
- מאיצים אלקטרונים חופשיים במתח של 50 וולט ואז יורים אותם לתוך גז זה.
  - עד איזה רמה יעוררו האלקטרונים הקשורים?
  - עם איזה אנרגיה קינטית יכולים לצאת האלקטרונים החופשיים?
- כמה קווי פליטה יהיו בספקטרום הפליטה של הליום זה, ומה אורכי הגל שלהם?
- מאירים על גז זה בפוטונים בעלי אורך גל 62 ננומטר. תארו מה יקרה.

**תשובות סופיות:**

(1) ראה סרטון.

(2) א. 6 קווים בספקטרום הפליטה,



ב. 1.  $E_k = 13\text{eV}$  - לא תהיה מסירה.

2.  $E_k = 2.8\text{eV}$  ← מסירה של  $10.2\text{eV}$

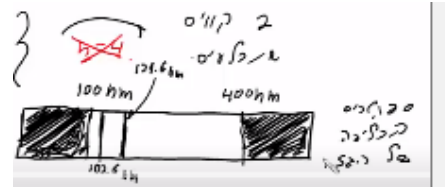
3.  $E_k = 0.91\text{eV}$  ← מסירה של  $12.09\text{eV}$

4.  $E_k = 0.25\text{eV}$  ← מסירה של  $12.75\text{eV}$

ג.  $7.93 \cdot 10^{-10} \text{ m}$

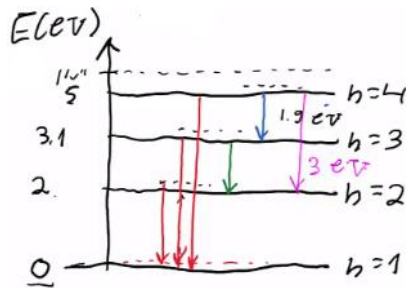
ב. ראה סרטון. ג.  $2.42 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

(3) א.



(4) ראה סרטון.

(5) א.  $E_3 = 5\text{eV}$ ,  $E_2 = 3.1\text{eV}$ ,  $E_1 = 2\text{eV}$

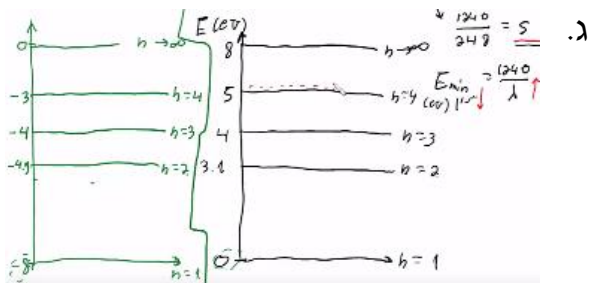


ב. 6 קווים בספקטרום הפליטה. ג. ראה סרטון.

ב.i. ראה סרטון.

(6) א.  $\Delta E_{1 \rightarrow 2} = 3.1\text{eV}$ ,  $\Delta E_{1 \rightarrow 3} = 4\text{eV}$ ,  $\Delta E_{1 \rightarrow 4} = 5\text{eV}$

ב.ii.  $8\text{eV}$

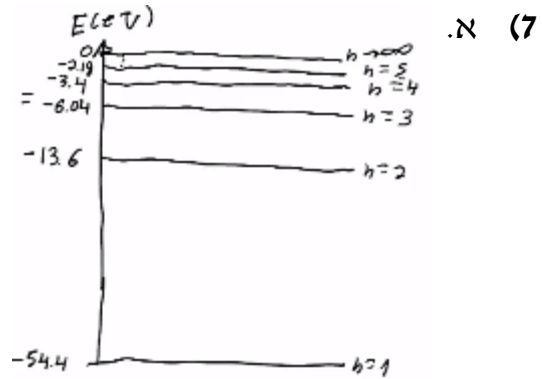


ד.  $\lambda_{4 \rightarrow 2} = 1378\text{nm}$ ,  $\lambda_{3 \rightarrow 1} = 248\text{nm}$ ,  $\lambda_{2 \rightarrow 2} = 653\text{nm}$ ,  $\lambda_{1 \rightarrow 3} = 1240\text{nm}$

$\lambda_{6 \rightarrow 1} = 400\text{nm}$ ,  $\lambda_{5 \rightarrow 3} = 310\text{nm}$

ה.  $1.24 \cdot 10^6 \frac{\text{m}}{\text{sec}}$

ב.i. עירור עד רמה  $n = 4$ .



ב.i.  $E_k = 52\text{eV}$ ,  $E_{k_{1 \rightarrow 2}} = 11.2\text{eV}$ ,  $E_{k_{1 \rightarrow 3}} = 3.64\text{eV}$ ,  $E_{k_{1 \rightarrow 4}} = 1\text{eV}$ .

ג. 6 קווים ספקטרליים:

ד.  $\lambda_1 = 470\text{nm}$ ,  $\lambda_2 = 122\text{nm}$ ,  $\lambda_3 = 24.3\text{nm}$ ,  $\lambda_4 = 164\text{nm}$ ,  $\lambda_5 = 25.6\text{nm}$ ,  $\lambda_6 = 30.4\text{nm}$ .

ד. ראה סרטון.

# יסודות הפיזיקה ב (20114)

פרק 10 - האפקט הפוטואלקטרי

תוכן העניינים

84 ..... 1. הסבר ותרגילים

## הסבר ותרגילים:

### רקע:

#### אנרגיה של פוטון:

$$E_{ph} = hf$$

$$E(eV) = \frac{12400}{\lambda(\text{\AA})} = \frac{1240}{\lambda(nm)}$$

#### אפקט פוטואלקטרי:

$$E_{ph} = E_k + B$$

### שאלות:

#### 1) אפקט פוטואלקטרי – תרגיל 1

תא פוטואלקטרי מסוים מוקרן באור בתדירויות משתנות. ברגע שהוא מוקרן באור בתדירות:  $f = 8 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$ , מתחילים להיפלט אלקטרונים מהקתודה.

- מה פונקציית העבודה של התא?
- כעת מקרינים את התא באורך גל של 300 ננומטר. מה תהיה האנרגיה המקסימלית של האלקטרונים הנפלטים?
- מה תהיה מהירותם?
- האם כל האלקטרונים הנפלטים בעלי מהירות זו? נמקו.

#### 2) אפקט פוטואלקטרי – תרגיל 2

- לתא פוטואלקטרי מסוים שורטט אופיין.
- הסבר כיצד ישתנה אופיין זה אם נאיר את התא עם 2 מנורות זהות לבודדה שהארנו בה קודם.
  - הסבר מה ישתנה באופיין אם נשתמש במקור אור בעל אורך גל ארוך יותר.
  - כיצד ישתנה האופיין אם נחליף הלוח הפולט במתכת בעלת פונקציית עבודה קטנה יותר.

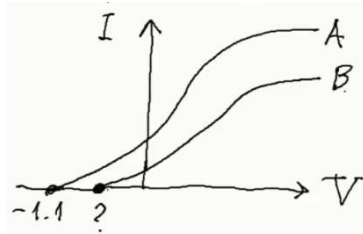
**3 אפקט פוטואלקטרי – תרגיל 3**

בוצעו 2 ניסויים בתא פוטואלקטרי:

בפעם הראשונה התא הואר באור באורך גל:  $\lambda_1 = 500$ , ובפעם השנייה הואר

באור באורך גל:  $\lambda_2 = 550$ .

תוצאות האופיין של 2 הניסויים לפניך.



א. לאיזה מהאופיינים מתאים כל אחד מאורכי הגל?

ב. מצא את פונקציית העבודה של המתכת.

ג. מצא את האנרגיה הקינטית המקסימלית

של האלקטרונים הנפלטים באופיין B.

ד. מצא את ערך סימן השאלה באופיין.

ה. תאר כיצד ייראה אופיין B, אם נרחיק מעט את מקור האור שלו מהתא.

**4 אפקט פוטואלקטרי – תרגיל 4**

תוצאות הניסוי של מיליקן מ-1916 מופיעות בטבלה הבאה:

$f(10^{14} \text{ Hz})$	$E_k \text{ (eV)}$
11.84	2.57
9.60	1.67
8.22	1.09
7.41	0.73
6.91	0.55

א. שרטט גרף של האנרגיה הקינטית כתלות בתדירות.

ב. מצא מהגרף את:

i. קבוע פלנק.

ii. את פונקציית העבודה של המתכת.

iii. את תדירות הסף של המתכת.

ג. הסבר את תוצאות המדידה האחרונה.

**5 אפקט פוטואלקטרי – תרגיל 5**

מנורה שהספקה 60 וואט מאירה באורך גל מונוכרומטי של 620 ננומטר על תא

פוטואלקטרי. ידוע שהאור עוקר אלקטרונים מהקתודה.

א. מה אנרגיית פוטון בודד של נורה זו?

ב. מה הזרם שיראה האמפרמטר שמחובר לתא, אם 1% מהפוטונים

שנפלטים מהנורה מגיעים לתא, 2% מהפוטונים שמגיעים לתא

עוקרים אלקטרונים ו-5% מהאלקטרונים הנעקרים מגיעים לאנודה?

ג. מהו זרם הרוויה של התא?

## תשובות סופיות:

- (1) א.  $3.31\text{eV}$     ב.  $0.82\text{eV}$     ג.  $V = 5.37 \cdot 10^5 \frac{\text{m}}{\text{sec}}$     ד. לא.
- (2) ראה סרטון.
- (3) א.  $\lambda_1 = A, \lambda_2 = B$     ב.  $B = 1.38\text{eV}$     ג.  $1.4 \cdot 10^{-19}\text{J}$     ד.  $0.87\text{V}$
- ה. ראה סרטון.
- (4) א.
- iii.  $5.6 \cdot 10^{14}\text{Hz}$     ג. ראה סרטון.
- (5) א.  $2\text{eV}$     ב.  $3 \cdot 10^{-4}\text{A}$     ג.  $6\text{mA}$

# יסודות הפיזיקה ב (20114)

פרק 11 - גרעין האטום, אנרגיית הגרעין ורדיואקטיביות

תוכן העניינים

1. הגרעין- הסבר	.....	(ללא ספר)
2. אנרגיית קשר של הגרעין ויציבות גרעינים	.....	87
3. רדיואקטיביות	.....	88
4. תגובות גרעיניות	.....	92

## אנרגיית קשר של הגרעין ויציבות גרעינים:

**רקע:**

**שקילות מסה-אנרגיה:**

$$\Delta E = \Delta mc^2$$

$$\Delta E (MeV) = \Delta m(u) \cdot 931.494 \frac{MeV}{u}$$

**שאלות:**

**1 אנרגיית קשר גרעינית - תרגיל 1**  
 חשבו את אנרגיית הקשר הגרעינית של ליתיום 7.

**2 אנרגיית קשר גרעינית - תרגיל 2**  
 מצאו את אנרגיית הקשר הממוצעת לנוקליאון של פחמן 12.

**תשובות סופיות:**

$$\Delta E = 39.2 MeV \quad (1)$$

$$E = 7.684 \quad (2)$$

## רדיואקטיביות:

רקע:

דעיכה של מקור רדיואקטיבי:

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N \quad \lambda - \text{קבוע דעיכה}$$

$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$

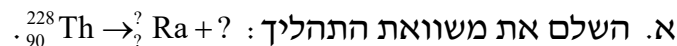
פעילות של מקור רדיואקטיבי:  $R = \lambda N$

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} \quad \text{זמן מחצית החיים:}$$

שאלות:

### 1 רדיואקטיביות - תרגיל 1

תוריום 228 מתפרק התפרקות אלפא ונוצר גרעין בת של רדיום 224.



ב. מצא את האנרגיה הקינטית המקסימלית האפשרית שתהיה לתוצר החסר.

נתון שמסתו האטומית של תוריום 228 היא:  $228.028741\text{u}$ , ומסתו האטומית

של רדיום 224 היא:  $224.020186\text{u}$ .

ג. הסבר מדוע כמעט בכל המקרים האנרגיה הקינטית של התוצר השני

תהיה קטנה מהערך שחישבת בסעיף ב'?

### 2 רדיואקטיביות - תרגיל 2

עורכים ניסוי עם חומר רדיואקטיבי בשם ביסמוט ( ${}_{83}^{210}\text{Bi}$ ).

נמצא, שחומר זה מתפרק התפרקות בטא מינוס לחומר לא-ידוע בשם פולוניום (Po).

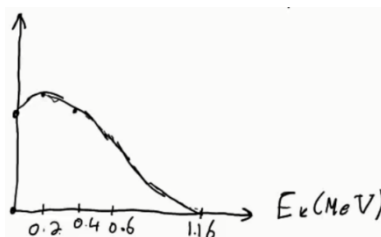
א. כתוב את משוואת ההתפרקות.

ב. בניסוי המשך עם חומר זה מודדים את מהירות החלקיקים הנפלטים

מהגרעין, ומשרטטים גרף של מספר החלקיקים הנפלטים בעלי אנרגיה

קינטית מסוימת, כתלות באנרגיה קינטית זו.

התקבל הגרף הבא:



- נתון שמסתו האטומית של ביסמוט זה היא :  $209.98412u$ , ושמסתו האטומית של פולוניום זה היא :  $209.98287u$ .
- הסבר כיצד נקודת החיתוך של הגרף עם הציר האופקי תומכת בחוק שימור מסה-אנרגיה.
  - הסבר מדוע שאר הנקודות בגרף לא סותרות חוק שימור זה, ואיזה תגלית היסטורית הוסקה בעזרת גרף זה.

### 3 רדיואקטיביות - תרגיל 3

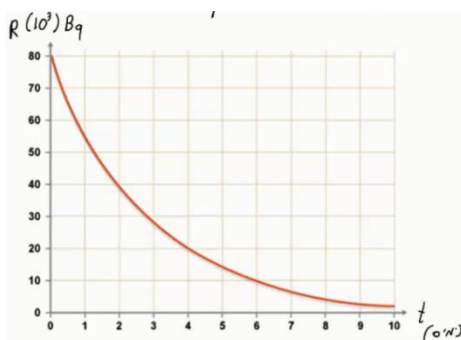
- נתון מדגם של חומר רדיואקטיבי בעל  $10^{10}$  גרעינים וזמן מחצית חיים של יומיים וחצי.
- כמה גרעינים רדיואקטיביים יישארו במדגם לאחר יומיים וחצי?
  - כמה גרעיני בת ייווצרו לאחר 7 וחצי ימים?
  - כמה גרעיני אב יישארו לאחר 9 ימים?
  - מה תהיה הפעילות לאחר 9 ימים?

### 4 רדיואקטיביות - תרגיל 4

- נתון מדגם של נתרן  $^{24}_{11}\text{Na}$  שמתפרק התפרקות בטא מינוס למגנזיום (Mg). מסת המדגם – 2 גרם. המסה האטומית של נתרן 24 היא :  $23.990962u$ .
- זמן מחצית החיים של נתרן היא 15 שעות.
- כתוב את משוואת תהליך ההתפרקות.
  - מה פעילות מדגם זה ברגע  $t = 0$ ?
  - מה תהיה פעילותו (בבקרל) לאחר 30 שעות?
  - כמה גרעיני בת יוצרו לאחר 42 שעות?

### 5 רדיואקטיביות - תרגיל 5

- חומר רדיואקטיבי מסוים מתפרק, כמופיע בתרשים הבא :
- מהו זמן מחצית החיים של החומר?
  - מתי תהיה פעילותו  $10^4$  בקרל?
  - מה תהיה פעילותו ברגע  $t = 17$  days?
  - הוסף לתרשים עקומה המתארת את כמות גרעיני הבת שנוצרו בתהליך, כתלות בזמן.



**6 רדיואקטיביות - תרגיל 6**

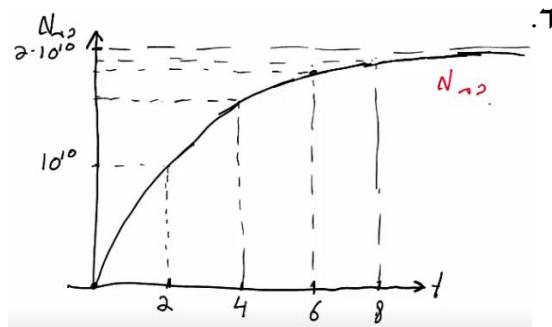
- אורניום  $^{235}_{92}\text{U}$  מתפרק בשרשרת התפרקויות שכוללת 3 התפרקויות אלפא ו-2 התפרקויות בטא מינוס.
- א. מצא את המספר האטומי ומספר המסה של הגרעין החדש שנוצר. אותו  $^{235}_{92}\text{U}$  ממשיך בשרשרת ההתפרקות שלו, ומסיים כאיזוטופ יציב של עופרת  $^{207}_{82}\text{Pb}$ .
- ב. מצא כמה התפרקויות אלפא וכמה התפרקויות בטא מינוס עבר בתהליך.

**7 רדיואקטיביות - תרגיל 7**

- פעילותו של 1 ק"ג חומר אורגני (חי) נמדדה ושווה ל-231 בקרל.
- א. ענה על הסעיפים הבאים:
- מה תהיה פעילותו של חומר אורגני שמת לפני 5,736 שנה?
  - לפני 11,472 שנה?
- ב. פעילותה של ערימת חומר (1 ק"ג) שנחפרה באפריקה נמדדה, ונמצא כי היא שווה ל-160 בקרל. מתי הפסיק לתפקד חומר זה?
- ג. מה תהיה פעילותו של 1 ק"ג חומר אורגני שהפסיק לתפקד לפני שבוע?
- ד. מה תהיה פעילותו של 1 ק"ג חומר אורגני שהפסיק לתפקד לפני 65 מיליון שנה?

## תשובות סופיות:

- (1) א.  ${}_{90}^{228}\text{Th} \rightarrow {}_{88}^{224}\text{Ra} + {}_2^4\text{He}$     ב.  $E_{v_{\max}} = -5.55 \text{ MeV}$     ג.  $E_{v_{\max}} < -5.55 \text{ MeV}$
- (2) א.  ${}_{83}^{210}\text{Bi} \rightarrow {}_{84}^{210}\text{Po} + {}_{-1}^0\text{e} + \bar{\nu}$     ב. הסברים בסרטון.
- (3) א.  $5 \cdot 10^9$     ב.  $8.75 \cdot 10^9$     ג.  $8.25 \cdot 10^8$
- (4) א.  ${}_{11}^{24}\text{Na} \rightarrow {}_{12}^{24}\text{Mg} + {}_{-1}^0\text{e} + \bar{\nu}$     ב.  $6.43 \cdot 10^{17} \text{ Bq}$     ג.  $1.61 \cdot 10^{17} \text{ Bq}$
- (5) א. יומיים.    ב. אחרי שישה ימים.    ג.  $221 \text{ Bq}$



- (6) א.  ${}_{88}^{223}\text{Ra}$     ב. 7 התפרקויות אלפא ו-4 בטא.
- (7) א.i.  $115.5 \text{ Bq}$     א.ii.  $57.75 \text{ Bq}$     ב. לפני 3,031 שנה בערך.
- ג. אי אפשר לדעת.    ד.  $R \rightarrow 0$

## תגובות גרעיניות:

### שאלות:

#### (1) תגובות גרעיניות - תרגיל 1

- יורים על גרעין  ${}_{13}^{27}\text{Al}$ , שמסתו האטומית:  $26.981538u$ , גרעין הליום. בתגובה נוצר גרעין לא ידוע, שמסתו:  $29.9783138u$ , וחלקיק נוסף – נויטרון. א. כתוב את משוואת התגובה הגרעינית, והשלם את המספרים לגרעין הלא-ידוע שסימונו P. ב. כמה אנרגיה מינימלית יש לתת לחלקיק האלפא בתגובה, כדי שתתרחש תגובה זו? ג. נותנים לו אנרגיה כפולה מהאנרגיה שחישבנו בסעיף ב'. לאן תלך אנרגיה זו לאחר התגובה?

#### (2) תגובות גרעיניות - תרגיל 2

- נתונה התגובה הבאה:  ${}^2_1\text{H} + {}^2_1\text{H} \rightarrow {}^3_2\text{H} + ?$ . א. השלם את התגובה. ב. נתון שאנרגיית הקשר לנוקליאון לדויטריום ( ${}^2_1\text{H}$ ) היא:  $1.11226\text{MeV}$ , ולהליום 3 ( ${}^3_2\text{H}$ ) היא:  $2.5727\text{MeV}$ . מצא כמה אנרגיה מינימלית יש להשקיע בתגובה הנ"ל, כדי שתקרה.

### תשובות סופיות:

- (1) א.  ${}_{13}^{27}\text{Al} + {}_2^4\text{He} \rightarrow {}_{15}^{30}\text{P} + {}_0^1\text{h}$  ב.  $\Delta E = 2.65\text{MeV}$  ג. אנרגיה קינטית לתוצרים ופליטה של אנרגיה בצורת פוטונים.  
 (2) א.  ${}^2_1\text{H} + {}^2_1\text{H} \rightarrow {}^3_2\text{H} + {}^1_0\text{n}$  ב. התהליך יקרה מעצמו (0).

# יסודות הפיזיקה ב (20114)

פרק 12 - תורת היחסות

תוכן העניינים

93	1. טרנספורמציות לורנץ למיקום והזמן
98	2. טרנספורמציות לורנץ למהירות
99	3. תרגילים לטרנספורמציות מיקום ומהירות
102	4. דינמיקה יחסותית
107	5. תרגילים לדינמיקה יחסותית
109	6. תרגילים נוספים

## טרנספורמציות לורנץ למיקום והזמן:

### רקע:

תורת היחסות הפרטית עוסקת בתיאור של מאורעות מנקודת המבט של צופים הנמצאים במערכות ייחוס שונות.

מערכות הייחוס תמיד יהיו מערכות אינרציאליות (צופים שזזים במהירות קבועה ביחס למערכת הכוכבים).

### הגדרת מאורע:

מאורע הוא אירוע פיזיקלי המוגדר בזמן ובמרחב. כל מאורע ניתן לתאר ע"י ארבע קואורדינטות  $(x, y, z, t)$ .

### 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. כתוצאה מכך מדידת הזמן שונה בין מערכות הייחוס. הזמן הופך לקואורדינטה רביעית (ביחד עם  $x, y, z$ ) שעוברת טרנספורמציה.

**טרנספורמציות לורנץ למיקום והזמן:**

$$x' = \gamma_0(x - v_0 t)$$

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

$$y' = y$$

$$z' = z$$

$$\beta = \frac{v_0}{c}$$

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

**טרנספורמציה הפוכה:**

$$x = \gamma_0(x' + v_0 t')$$

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

$$y' = y$$

$$z' = z$$

**תנאים לשימוש בטרנספורמציות לורנץ:**

הצירים של המערכות מקבילים.

בזמן:  $t = t' = 0$  הראשיות מתלכדות.

**המערכת העצמית:**

מערכת עצמית היא מערכת בה המאורע הנצפה נמצא במנוחה.

**זמן עצמי  $\tau$**  - מוגדר להיות הפרש הזמנים בין שני מאורעות כפי שהוא נמדד במערכת העצמית שלהם.

**אורך עצמי** - האורך של גוף כפי שנמדד במערכת בו הגוף נמצא במנוחה.

התכווצות האורך:

$$l = \frac{l_0}{\gamma_0}$$

$l_0$  - האורך העצמי

התארכות הזמן:

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

שינוי זווית במדידת אורך:

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

$\theta'$  - זווית במערכת העצמית

אפקט דופלר היחסותי:

זמן המחזור של הגל:

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

אורך הגל:

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

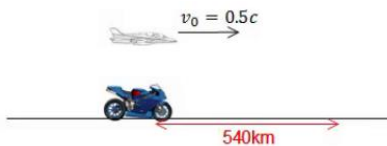
$\lambda'$  - אורך הגל במערכת העצמית

תדירות הגל :

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

$f'$  - תדירות במערכת העצמית

### שאלות:



#### 1) מציאת מהירות ומיקום אופנוע

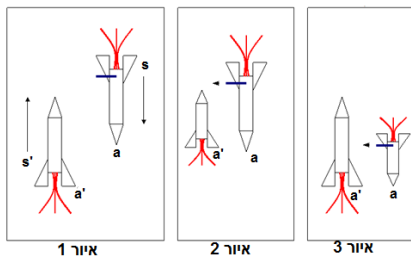
אופנוע נוסע במהירות קבועה בקו ישר. צופה על הקרקע מודד כי האופנוע נסע מרחק של 540km.

צופה הנע במטוס ממש מהיר  $v = 0.5c$ , בכיוון נסיעת האופנוע, מודד כי משך זמן נסיעת האופנוע היה 0.01 שניה.

א. מצא את מהירות האופנוע במערכת כדה"א.

ב. מצא את המרחק שעבר האופנוע כפי שמדד הצופה במטוס.

#### 2) בדיקת ירי



שתי חלליות בעלות אורך מנוחה זהה, עוברות זו במקביל לזו במהירות גבוהה.

בזנב החללית S מצוי תותח המכוון בניצב לכיוון תנועת החללית ולעבר מסלול התנועה של החללית s' (איור 1).

בחללית S מתבצעת בדיקת ירי בתותח ברגע

שהנקודה a בראש החללית מתלכדת עם הנקודה a' (זנב s').

מכיוון שאורך החללית s' קצר מהאורך העצמי בחללית ב-s מניחים כי הטיל יפספס את החללית השנייה (איור 2).

אולם במערכת s' אורך החללית S קצר מהאורך העצמי ולכן כאשר a ו-a' מתלכדות האסטרונאוט S יפגע (איור 3).

ישבי את הפרדוקס.

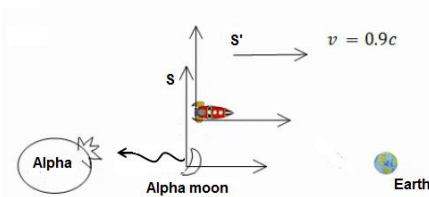
**(3) מוט פולט אור לסירוגין**

מוט בעל אורך  $l_0$  נע במהירות  $V$  נתונה ביחס לכדה"א.  
נתון כי ב- $t = 0$  הקצה השמאלי של המוט נמצא ב- $x = x' = 0$ .  
ברגע זה המוט פולט אור מקצהו הימני.  
לאחר זמן  $\tau$  המוט פולט אור מקצהו הימני.  
מצא את הפרש הזמנים כפי שרואה אותם צופה מכדה"א  
(הפרש הזמנים בין הגעת האור משני המאורעות לראשית).



**(4) פיצוץ בכוכב אלפה**

החללית אנטרייז יוצאת מכוכב אלפה חזרה לכדה"א.  
בדרך היא עוברת ליד הירח של כוכב אלפה ורואה  
פולס אלקטרו מגנטי חזק יוצא לכיוון הכוכב.  
ידוע שבירח ישנה קבוצת חייזרים תוקפניים בשם  
ה"קליגוניים". 1.3 שניות מאוחר יותר היא רואה  
פיצוץ בכוכב. המרחק בין הכוכב לירח שלו  
הוא 500 מיליון מטרים כפי שנמדד במערכת החללית.  
מהירות החללית ביחס לכוכב ולירח היא  $0.9c$ .



- א. מהו מרווח הזמן בין גילוי הגל לפיצוץ במערכת הכוכב והירח?
- ב. מה משמעות הסימן בהפרש הזמן?
- ג. האם הפולס גרם לפיצוץ או להיפך?

**תשובות סופיות:**

1) א.  $v = 5.65 \cdot 10^7 \frac{m}{sec}$  ב.  $x'_2 = -10.32 \cdot 10^5 m$

2) ראה סרטון.

3)  $\Delta t = \gamma_0 (1 + \beta) \left( \tau - \frac{l_0}{c} \right)$

4) א.  $t_3 = -3.525 sec$  ב. הפיצוץ היה לפני הגעת הגל לכוכב וגם לפני ירי הגל.

ג. לא יכול להיות שהפיצוץ גרם לירי של הפולס,  $x_2 = 11.47 \cdot 10^8 \cdot m > 10.575 \cdot 10^8 m$

## טרנספורמציית לורנץ למהירות:

רקע:

$$v'_x = \frac{v_x - v_0}{1 - \frac{v_0 v_x}{c^2}}$$

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

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

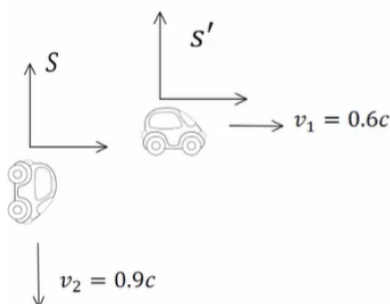
אברציה - שינוי זווית המהירות:

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

שאלות:

### (1) מהירות יחסית בין מכוניות

שתי מכוניות נוסעות האחת במאונך לשנייה כך שמהירות המכונית הראשונה היא  $0.6c$  ומהירות המכונית השנייה היא  $0.9c$ . מצא את המהירות היחסית.



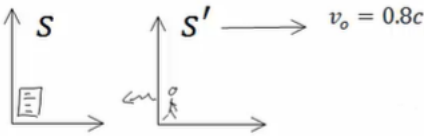
תשובות סופיות:

$$v'_{2x} = -0.6c, v'_{2y} = -0.72c \quad (1)$$

## תרגילים לטרנספרמציית מיקום ומהירות:

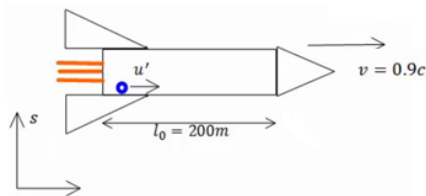
### שאלות:

#### 1) דודה יוצאת לטיול



המבחן בפיזיקה התחיל בשעה 9:00 והמשגיחה יצאה לטיול במהירות  $0.8c$  (דודה זריזה במיוחד). לאחר שעה לפי שעונה היא שולחת לסטודנטים אות רדיו לסיים את הבחינה. כמה זמן ארכה הבחינה עבור הסטודנטים?

#### 2) כדור מתגלגל בחללית



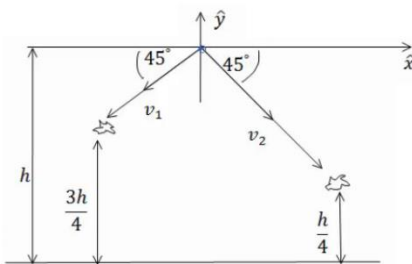
חללית בעלת אורך עצמי של 200 מטר נעה במהירות  $0.9c$  ביחס למערכת אינרציאלית  $S$ . כדור קטן מתגלגל לאורכה במהירות  $u' = 0.04c$  בכיוון ציר  $x$ , כפי שנמדד ע"י צופה בחללית.

א. מהי מהירות הכדור כפי שנמדדת ע"י צופה ב- $S$ ? (הבא את התשובה ביחידות של  $c$ ).

ב. מהו הזמן שייקח לכדור לעבור מקצה לקצה של החללית כפי שנמדד ב- $s$ ? (הבא את התשובה במיליוניות שנייה).

ג. איזה מרחק עבר הכדור לפי צופה במערכת  $s$ ? (ביחידות של ק"מ).

#### 3) חלקיקים נוצרים בגובה ומתפרקים



שני חלקיקים נוצרים בגובה  $h$  מעל הקרקע. אחד נפלט בזווית 225 מעלות עם ציר ה- $x$  והשני בזווית  $-45$  מעלות עם ציר ה- $x$ .

החלקיק הראשון מתפרק לאחר זמן  $T$  בגובה  $\frac{3h}{4}$

והחלקיק השני מתפרק לאחר זמן  $T_2$  בגובה  $\frac{h}{4}$ .

התעלם מהכבידה בבעיה.

א. הבע את מהירויות החלקיקים באמצעות  $h$  ו- $T$ .

ב. מצא את זמן החיים העצמי של כל חלקיק (זמן החיים במערכת המנוחה).

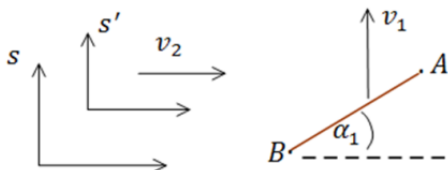
ג. מצא מערכת  $s'$  הנעה בכיוון החיובי של ציר ה- $x$  בה ההתפרקויות מתרחשות באותו הזמן.

ד. מה המרחק בין ההתפרקויות במערכת  $s'$ ?

**(4) מיואון מתפרק ליד אלקטרון**

- מיואון ( $\mu$ ) נוצר ברגע מסוים ונע במהירות  $0.7c$  ביחס לקרקע. המיואון מתפרק לאחר שנע  $3$  ק"מ ממקום היווצרו.
- כמה זמן חי המיואון במערכת העצמית שלו? אלקטרון נע במקביל למיואון ובמהירות  $0.5c$  ביחס למעבדה.
  - מהי מהירות המיואון ביחס לאלקטרון?
  - איזה מרחק נע המיואון ביחס לאלקטרון.

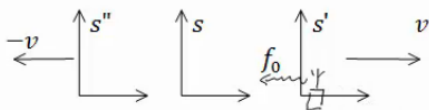
**(5) זווית של מוט נע**



מוט בעל אורך  $l$  (לא נתון) נע במהירות  $v_1$  בכיוון ציר ה- $y$  ביחס לצופה הנמצא במעבדה. הצופה במעבדה מודד זווית  $\alpha_1$  של המוט ביחס לציר ה- $x$ .

איזו זווית ימדוד צופה הנע במהירות  $v_2 \hat{x}$  ביחס למעבדה?

**(6) תדר יחסי**



במערכת  $s'$  הנעה במהירות  $v$  ביחס למערכת המעבדה  $S$ , נמצא משדר רדיו הפולט אותות בתדירות  $f_0$ ?

- מה תהיה התדירות שתיקלט במעבדה?
- מה תהיה התדירות שתיקלט במערכת  $s''$  הנעה במהירות  $\vec{v} = -v\hat{x}$  ביחס למעבדה?

## תשובות סופיות:

$$\Delta t = 1.08 \cdot 10^4 \text{ sec} \quad (1)$$

$$x_1 = 10.78 \text{ km} \quad \lambda \quad t_1 = 39.62 \mu\text{s} \quad \text{ב.} \quad v_x = 0.907c \quad \text{א.} \quad (2)$$

$$\tau_1 = T \sqrt{1 - \frac{h^2}{8T^2c^2}}, \quad \tau_2 = 2T \sqrt{1 - \frac{9h^2}{64T^2c^2}} \quad \text{ב.} \quad v_1 = \frac{h}{2\sqrt{2}T}, \quad v_2 = \frac{3h}{4\sqrt{2}T} \quad \text{א.} \quad (3)$$

$$d'^2 = \frac{5h^4 - 3c^2T^2h^2 + c^4T^4}{h^2 - c^2T^2} \quad \text{ד.} \quad v_0 = \frac{c^2T}{h} \quad \text{ג.}$$

$$\Delta x_{12} = 0.98 \text{ km} \quad \lambda \quad V_{12} = 0.31c \quad \text{ב.} \quad \tau = 10^{-5} \text{ sec} \quad \text{א.} \quad (4)$$

$$\tan \alpha' = \gamma_2 \left( \tan \alpha_1 + \frac{v_1 v_2}{c^2} \right) \quad (5)$$

$$f'' = \sqrt{\left( \frac{1-\beta}{1+\beta} \right)^2} f_0 \quad \text{ב.} \quad f_s = \sqrt{\frac{1-\frac{v}{c}}{1+\frac{v}{c}}} f_0 \quad \text{א.} \quad (6)$$

## דינמיקה יחסותית:

רקע:

תנע ואנרגיה יחסותיים:

$$\vec{p} = \gamma m \vec{v}$$

$$E = \gamma mc^2$$

הגודל  $\gamma$  קשור עכשיו למהירות הגוף עבורו נרצה לחשב את התנע ואינו קשור 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, ניוטרינו).

$$E = |p|c = h\nu$$

$\nu$  – תדירות

קבוע פלאנק:

$$h = 6.626 \cdot 10^{-34} \text{ j} \cdot \text{s}$$

## טרנספורמציה של התנע והאנרגיה:

$$E' = \gamma_0(E - v_0 p_x)$$

$$p'_x = \gamma_0(p_x - v_0 E/c^2)$$

$$p'_y = p_y$$

$$p'_z = p_z$$

## וקטור תנע אנרגיה:

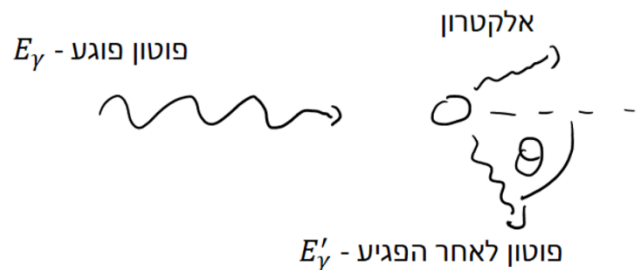
$$\left( p_x, p_y, p_z, \frac{E}{c} \right)$$

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

- הקבוע זהה בכל מערכות הייחוס.
- 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 נפלט אלקטרון וכיוון התנועה של הפוטון משתנה.



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

$E_\gamma$  - אנרגיית הפוטון לפני הפגיעה

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

$m_e$  - מסת אלקטרון

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

**יחידת האלקטרון וולט:**

$$1 \text{ eV} = 1.602\,176\,462 \times 10^{-19} \text{ J}$$

Object	Mass (kg)	Energy Equivalent	
Electron	$\approx 9.11 \times 10^{-31}$	$\approx 8.19 \times 10^{-14} \text{ J}$	( $\approx 511 \text{ keV}$ )
Proton	$\approx 1.67 \times 10^{-27}$	$\approx 1.50 \times 10^{-10} \text{ J}$	( $\approx 938 \text{ MeV}$ )
Uranium atom	$\approx 3.95 \times 10^{-25}$	$\approx 3.55 \times 10^{-8} \text{ J}$	( $\approx 225 \text{ GeV}$ )

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

**שאלות:**

**(1) הגעת נויטרון ממרחקים**

מצא את האנרגיה הדרושה לנויטרון להגיע לכדור הארץ ממרחק של 5 שנות אור בהינתן שזמן החיים של נויטרון הוא 881 שניות והמסה שלו היא:  $M_n = 940 \text{ Me} \frac{V}{c^2}$ .

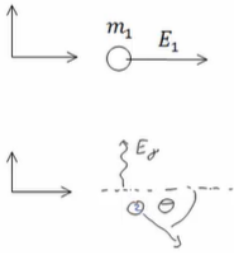
**(2) התנגשות בסיסית**

חלקיק בעל מסה  $m$  מתנגש בחלקיק בעל מסה  $3m$ . לחלקיק הראשון אנרגיה כוללת לפני ההתנגשות  $5mc^2$  ונתון כי התנע הכולל שלהם במערכת המעבדה הוא אפס. כתוצאה מההתנגשות שני החלקיקים מושמדים ונוצר חלקיק חדש הנמצא במנוחה.

א. מצאו את האנרגיה הקינטית של החלקיק הראשון.

ב. מצאו את פקטור לורנץ של החלקיקים לפני ההתנגשות ואת האנרגיה הקינטית של החלקיק השני.

ג. מצאו את מסת החלקיק הנוצר לאחר ההתנגשות.



**(3) חלקיק מתפרק לפוטון וחלקיק נוסף**

לפני חלקיק בעל אנרגיה כוללת  $E_1$  ומסת מנוחה  $m_1$  נע במעבדה בכיוון החיובי של ציר ה- $x$ .  
ברגע מסוים מתפרק החלקיק לפוטון ולחלקיק נוסף.  
אנרגיית הפוטון נתונה  $E_y$  וידוע כי הפוטון נע בציר ה- $y$ , בכיוון החיובי.

- א. מהו התנע של החלקיק הראשון לפני ההתפרקות?
  - ב. מהי הזווית של התנע של חלקיק 2 ביחס לציר ה- $x$ ?
  - ג. מצא מערכת ייחוס חדשה  $S'$  שבה הפוטון יפלט בכיוון נגדי לכיוון תנועתו של חלקיק מס' 2.
- מה מהירותה של מערכת זו ביחס למערכת המעבדה?

**(4) פוטון פוגע בפרוטון ויוצר פיון**

פוטון פוגע בפרוטון הנמצא במנוחה במערכת המעבדה.  
נתונות מסת הפרוטון והפיון  $M_p, M_\pi$ .  
מהי האנרגיה המינימלית הדרושה לפוטון על מנת שלאחר ההתנגשות ייווצרו פרוטון ופיון ( $\pi$ )?

**(5) דוגמה - חישוב תנע ואנרגיה קינטית של אלקטרון ופרוטון**

חשבו את התנע והאנרגיה הקינטית של פרוטון ואלקטרון בעלי אנרגיה של 1 GeV במערכת המעבדה.

**(6) דוגמה - גמה וביטה של אלקטרון**

מסת האלקטרון היא:  $9.10938188 \times 10^{-31} \text{ kg}$  ומהירות האור היא:  $299792458 \text{ m/sec}$ .  
מצאו בדיוק של 6 ספרות את  $\gamma$  ו- $\beta$  של אלקטרון שהאנרגיה הקינטית שלו היא:  $K = 100.000 \text{ MeV}$  במערכת המעבדה.

**(7) בטה של מיואונים מתפרקים**

מסת מיואון היא פי 207 ממסת האלקטרון.  
זמן מחצית החיים הממוצע של מיואון הוא  $2.20 \mu\text{s}$ .  
מיואונים נעים ביחס למעבדה בניסוי כלשהו.  
זמן החיים הנמדד של המיואונים ביחס למערכת המעבדה הוא:  $6.90 \mu\text{s}$ .  
מהם  $\beta$ , התנע והאנרגיה הקינטית של המיואונים ביחידות  $\frac{\text{MeV}}{c}$ ?

## תשובות סופיות:

$$E_n = 1.69 \cdot 10^8 \text{ MeV} \quad (1)$$

$$m_3 = 6.91 \text{ m} \quad \text{ג} \quad \gamma_1 = 5, \gamma_2 = \sqrt{\frac{11}{3}}, E_{k_2} = 3mc \left( \sqrt{\frac{11}{3}} - 1 \right) \quad \text{ב} \quad E_{k_1} = 4mc^2 \quad \text{א} \quad (2)$$

$$\tan \theta = -\frac{E_\gamma}{\sqrt{E_1^2 - m_1^2 c^4}} \quad \text{ב} \quad \vec{p}_1 = \sqrt{\left(\frac{E_1}{c}\right)^2 - m_1^2 c^2} \cdot \hat{x} \quad \text{א} \quad (3)$$

$$v_0 = \sqrt{1 - \left(\frac{m_1 c^2}{E_1}\right)^2} \cdot c \quad \text{ג}$$

$$E_\gamma = \frac{1}{2m_p} (m_\pi^2 + 2m_\pi m_p) c^2 \quad (4)$$

$$K = 0.999 \text{ GeV}, P = 1 \frac{\text{GeV}}{c} \quad \text{אלקטרון:} \quad (5)$$

$$K = 0.062 \text{ GeV}, P = 0.347 \frac{\text{GeV}}{c} \quad \text{פרוטון:}$$

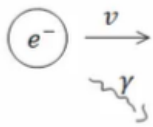
$$\gamma = 196.695, \beta = 0.999987 \quad (6)$$

$$\beta = 0.898, P = 314 \frac{\text{MeV}}{c}, K = 226 \text{ MeV} \quad (7)$$

## תרגילים לדינמיקה יחסותית:

### שאלות:

- (1) **חלקיק מתפרק לשני חלקיקים**  
 חלקיק בעל מסה  $m$  הנמצא במנוחה מתפרק לשני חלקיקים בעלי מסות מנוחה  $m_1, m_2$ .  
 מה יהיו האנרגיה והתנע של החלקיקים שנוצרו? (כל המסות נתונות).

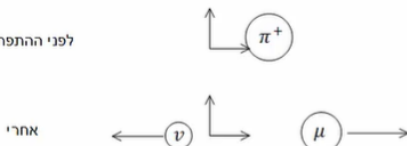


- (2) **אלקטרון חופשי פולט פוטון**  
 הראו כי אלקטרון חופשי הנע בואקום אינו יכול לפלוט פוטון בודד.

- (3) **התנגשות חלקיקים זהים ויצירת חלקיקים**  
 חלקיק בעל מסת מנוחה  $m$  פוגע בחלקיק זהה לו הנמצא במנוחה. כתוצאה מההתנגשות נוצרים שני חלקיקים בעלי מסות מנוחה  $m_1, m_2$ . מצא את אנרגיית הסף ליצירת ריאקציה זו. (הנחש:  $(m_1 + m_2) > 2m$ ).

### (4) פיון מתפרק

לפני ההתפרקות



פיון ( $\pi^+$ ) מתפרק למיואון חיובי ( $M_\mu = 160Me \frac{v}{c^2}$ ) וניטרינו חסר מסה.

מצא את מסת המנוחה של הפיון אם למיואון אנרגיה קינטית של  $5MeV$ .



- (5) **פוטון מתנגש אלסטית באלקטרון**  
 אלקטרון נע במהירות  $v$  ומתנגש בפוטון בעל אנרגיה  $E_\gamma$  הנע לקראתו. מצא את הערך של  $v$  אם ידוע כי הפוטון מוחזר באותה אנרגיה בה פגע. הנח כי מסת האלקטרון ידועה.

## תשובות סופיות:

$$, E_1 = m_1 c^2 \gamma_1 = \frac{c^2}{2m} (m^2 + m_1^2 - m_2^2), p_1 = c \sqrt{\frac{1}{2m} (m^2 + m_1^2 - m_2^2)^2 - 1} \quad (1)$$

$$E_2 = m_2 c^2 \gamma_2 = \frac{c^2}{2m} (m^2 + m_2^2 - m_1^2), p_2 = m_2 c \sqrt{\gamma_2^2 - 1} = c \sqrt{\frac{1}{2m} (m^2 + m_2^2 - m_1^2)^2 - 1}$$

שאלת הוכחה. (2)

$$E_{\min} = \frac{1}{2m} c^2 ((m_1 + m_2)^2 - 2m^2) \quad (3)$$

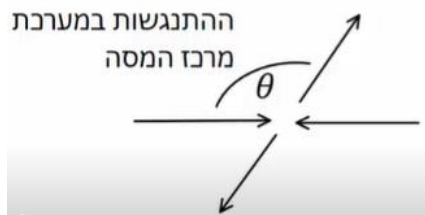
$$M_\pi = 144 \frac{\text{MeV}}{c^2} \quad (4)$$

$$v = c \left| 1 - \left( \left( \frac{E_\gamma}{m_e c^2} \right)^2 + 1 \right)^{-1/2} \right| \quad (5)$$

## תרגילים נוספים:

### שאלות:

#### (1) פוטון מתנגש ומעבר למרכז מסה



פוטון עם אנרגיה  $E_0$  מתנגש אלסטית עם חלקיק בעל מסה  $m$  הנמצא במנוחה (במערכת המעבדה).

א. מצא את מהירות מערכת מרכז המסה של המערכת פוטון פלוס חלקיק.

ב. מצא את התנע והאנרגיה של החלקיק והפוטון לפני ההתנגשות במערכת מרכז המסה.

מצא את התנע והאנרגיה של הפוטון והחלקיק אחרי ההתנגשות אם ידוע שהפוטון מפוזר בזווית  $\theta$  ביחס לכיוון בפגיעה במערכת מרכז המסה (ראה איור).

ג. מהם האנרגיה והערך המוחלט של התנע של הפוטון והחלקיק לאחר ההתנגשות במערכת המעבדה?

ד. מצא את הזווית  $\theta$  עבורה האנרגיה של הפוטון במערכת המעבדה תהיה מינימלית.

#### (2) שאלה 1

נתונים שני גופים הנעים בניצב זה לזה. ידוע כי מסת הגופים זהה ושווה ל- $M$ ,

וכן כי התנעים של הגופים הם:  $p_1, p_2$ .

ברגע מסוים, הגופים מתנגשים ומופיעים ארבעה גופים חדשים.

מסות הגופים החדשים שנוצרו הן:  $m, 2m, 3m, 4m$ .

מהו  $m$  המקסימלי האפשרי?

נתון:  $p_1 = 6Mc, p_2 = 17Mc$ .

#### (3) שאלה 2

נתונים שני חלקיקים בעלי מסה  $m$ , וכן נתונות האנרגיות שלהם  $E_1, E_2$ .

החלקיקים נעים זה אל עבר זה, ומתנגשים.

חשבו את מסת החלקיק  $M$  הנוצר כתוצאה מהתנגשות החלקיקים.

נתון:  $E_1 = 4mc^2, E_2 = 7mc^2$ .

**(4) שאלה 3**

שתי חלליות יוצאות מאותה נקודה, בכיוון ניצב אחת לשנייה. חללית א' טסה במהירות  $v_1$ , וחללית ב' טסה במהירות  $v_2$ . חשבו את וקטור המהירות של חללית ב' ביחס לחללית א'. נתון:  $v_1 = 0.8c(+\hat{x})$ ,  $v_2 = 0.9c(-\hat{y})$

**(5) שאלה 4**

חלקיקים 1,2 נוצרים במעבדה ונמצאים במנוחה. ידוע לגבי זמני החיים שלהם כי:  $t_2 = 0.75t_1$  (במצב מנוחה חלקיק 2 נעלם לפני חלקיק 1). מהי המהירות אליה יש להאיץ את חלקיק 2, כדי שלא ידעך לפני חלקיק 1?

**(6) זריקה אופקית יחסותית**

מסלולו של חלקיק במערכת S נתון ע"י:  $x = vt$ ,  $y = \frac{1}{2}at^2$ , כאשר  $v$ ,  $a$  קבועים ידועים. מצא את תאוצת החלקיק במערכת S' הנעה במהירות  $v$  בכיוון ציר ה-x ביחס ל-S. תאר את צורת המסלול בשתי המערכות ( $v$  אינה זניחה ביחס למהירות האור).

## תשובות סופיות:

$$v_{c.m} = \frac{E_0 \cdot c}{mc^2 + E_0} \quad \text{א. (1)}$$

$$E'_{pH} = E_0 \sqrt{\frac{mc^2}{2E_0 + mc^2}}, \quad P'_{pH} = \frac{E_0}{c} \sqrt{\frac{mc^2}{2E_0 + mc^2}} \quad \text{ב. פוטון לפני ההתנגשות:}$$

$$E'_m = mc^2 \left( \frac{mc^2 + E_0}{\sqrt{m^2 c^4 + 2E_0 mc^2}} \right), \quad P'_{m_x} = \frac{-mE_0 c}{\sqrt{m^2 c^4 + 2E_0 mc^2}} \quad \text{חלקיק לפני ההתנגשות:}$$

פוטון אחרי ההתנגשות: אותו דבר כמו לפני ההתנגשות.

חלקיק אחרי ההתנגשות: אותו דבר כמו לפני ההתנגשות.

$$\vec{P}_{pH} = (P(-\cos \theta), P \sin(\theta), 0), \quad \vec{P}_m = -\vec{P}_{pH} = (P \cos \theta, P \sin \theta, 0) \quad \text{כיוון התנע:}$$

$$E'_m = mc^2 \left( \frac{mc^2 + E_0}{\sqrt{m^2 c^4 + 2E_0 mc^2}} \right), \quad |P'_m| = \sqrt{\left( \frac{E'_m}{c} \right)^2 - m^2 c^2} \quad \text{ג.}$$

$$\theta = \frac{\pi}{2} \quad \text{ד.}$$

$$m_{\max} \approx 1.45M \quad \text{(2)}$$

$$M \approx \sqrt{112}m \quad \text{(3)}$$

$$\vec{v}' = (-0.8c, -0.54c, 0) \quad \text{(4)}$$

$$v \approx 0.66c \quad \text{(5)}$$

$$x' = 0, \quad y' = \frac{1}{2} a \gamma_0^2 t'^2 \quad \text{(6)}$$