

# פיזיקה קלאסית 2 (לפיזיקאים)



## תוכן העניינים

1	מבוא מתמטי
3	חוק קולון
9	חוק גאוס
16	פוטנציאל
27	דיפול חשמלי
31	מציאת התפלגות מטען
34	אנרגיה הדרושה לבניית מערכת
36	מטעני דמות
42	חומרים דיאלקטריים
48	מעגלי זרם ישר
52	קבלים
67	נגדים זרם וצפיפות זרם
71	חוק לורנץ וכוח על תייל נושא זרם
81	אפקט הול
82	חוק ביו סבר
86	חוק אמפר
89	מציאת צפיפות זרם משדה מגנטי נתון
90	חוק פאראדיי
100	טרנספורמציה יחסותית (לורנץ) לשדות החשמלי והמגנטי
101	טרנספורמציה יחסותית של השדות עם נוסחאות מלאות
102	שדות משתנים בזמן
105	מומנט דיפול מגנטי
106	השראות

# תוכן העניינים

111	24. הפוטנציאל הוקטורי
113	25. חומרים מגנטיים
116	26. מעגלי זרם חילופין
(ללא ספר)	27. משוואות מקסוואל
120	28. גלים אלקטרומגנטיים
122	29. וקטור פויינטינג והאנרגיה האגורה בשדות
123	30. תרגילים ברמת מבחן

# פיזיקה קלאסית 2 (לפיזיקאים)

פרק 1 - מבוא מתמטי

תוכן העניינים

1. קואורדינטות ..... 1
2. צפיפות מטען ..... 2
3. וקטורים ..... (ללא ספר)
4. אופרטור הנאבלה ..... (ללא ספר)

## קואורדינטות:

### שאלות:

**(1) שטח דיסקה**

חשב שטח דסקה בעלת רדיוס  $R$  (שטח מעגל) באמצעות אינטגרל על אלמנט שטח בקואורדינטות פולריות.

**(2) חישוב נפח כדור**

חשב נפח של כדור באמצעות אינטגרל על אלמנט נפח בקואורדינטות כדוריות.

### תשובות סופיות:

$$\pi R^2 \quad (1)$$

$$\frac{4\pi R^3}{3} \quad (2)$$

## צפיפות מטען:

### שאלות:

#### (1) דסקה עם חור

מצא את צפיפות המטען של דסקה בעלת רדיוס  $R$  הטעונה במטען כולל  $Q$  המתפלג בצורה אחידה. בדסקה קדחו חור ברדיוס  $r$ , מצא את כמות המטען שהוצאה מהדסקה.

#### (2) מטען כולל בכדור

מצא את המטען הכולל בכדור בעל רדיוס  $R$  וצפיפות מטען  $\rho(r) = \rho_0 \frac{r}{R}$ .

### תשובות סופיות:

$$Q \left( \frac{r}{R} \right)^2 \quad (1)$$

$$\rho_0 \pi R^3 \quad (2)$$

# פיזיקה קלאסית 2 (לפיזיקאים)

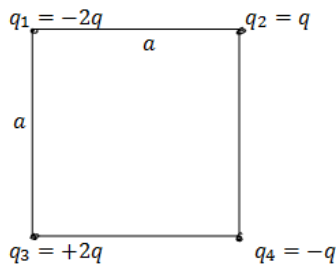
פרק 2 - חוק קולון

תוכן העניינים

1. חוק קולון וסופרפוזיציה ..... 3
2. התפלגות מטען רציפה ..... 5

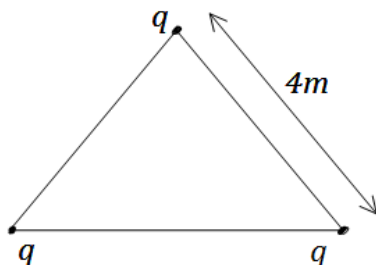
## חוק קולון וסופרפוזיציה:

### שאלות:



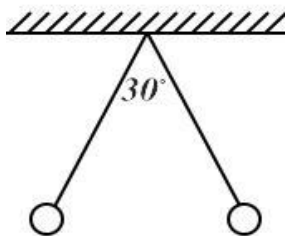
#### (1) מטען בפינת ריבוע

חשב את הכוח הפועל על המטען שבפינה התחתונה הימנית של הריבוע שבשרטוט.  $q$  ו- $a$  נתונים.



#### (2) מטענים בקודקודי משולש

שלושה מטענים זהים נמצאים על קודקודיו של משולש שווה צלעות. גודל כל מטען הוא  $q = 2\mu\text{C}$  ואורך צלע המשולש היא  $4\text{m}$ . מצא את הכוח שמרגיש כל מטען כתוצאה מהמטענים האחרים.

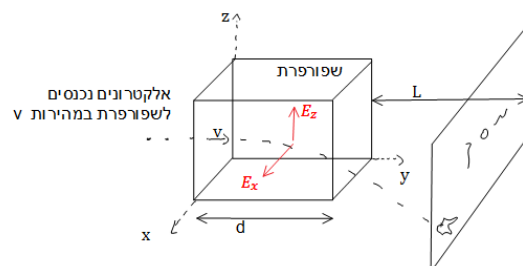


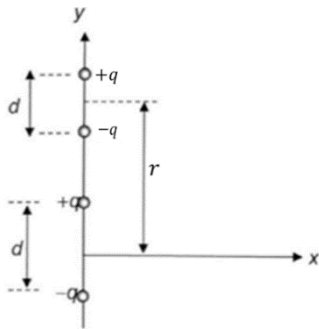
#### (3) שני כדורים תלויים

שני כדורים בעלי מסה  $m$  ומטען זהה תלויים מהתקרה ע"י חוטים בעלי אורך  $L$ . הזווית בין החוטים היא  $30^\circ$  מעלות. מצא את מטען הכדורים.

#### (4) שפורפת טלויזיה

אלקטרונים נכנסים לשפורפת במהירות  $V$  נתונה. בשפורפת יש שדה קבוע בשני הכיוונים הניצבים למהירות כניסת האלקטרונים. אורך השפורפת הוא  $d$ . חשב את נקודת הפגיעה של האלקטרונים במסך הנמצא במרחק  $L$  מקצה השפורפת. הנח כי  $d \ll L$  וכי מסת ומטען האלקטרון ידועים.





**5) דיפול מפעיל כוח על דיפול**

דיפול חשמלי מורכב משני מטענים נקודתיים  $\pm q$

הנמצאים בנקודות  $\left(0, \pm \frac{d}{2}\right)$  (ראו איור).

א. חשבו את השדה החשמלי שיוצר הדיפול

בנקודה  $(y, 0)$  שעל ציר ה- $y$ .

ב. השתמשו בתוצאת הסעיף הקודם וחשבו את

הכוח שמפעיל הדיפול הני"ל על דיפול נוסף

שמטעניו גם כן  $\pm q$  המרוחקים זה מזה

מרחק  $d$  (המצוי על ציר ה- $y$  גם כן) ואשר מרכזו

במרחק  $r$  ממרכז הדיפול הראשון. הניחו ש- $r > d$ .

ג. למה תצטמצם תשובתכם לסעיף קודם עבור  $r \gg d$ ?

הדרכה: השתמשו בפיתוח לטור טיילור (או מקלורן) של פונקציית

החזקה:  $(1+x)^n \approx 1+nx + \frac{n(n-1)}{2}x^2 \dots +$

**תשובות סופיות:**

(1)  $\frac{kq^2}{a^2} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{2}}\right)$

(2)  $3.897 \cdot 10^{-3} \text{ N}$

(3)  $\sqrt{\frac{mg}{k}} \tan(15^\circ) L^2 (2 - \sqrt{3})$

(4)  $z \approx \frac{|e|E_z d \cdot L}{mv^2}, \frac{|e|E_x d \cdot L}{mv^2}$

(5) א.  $\vec{E}(y) = kq \left[ \frac{1}{\left(y - \frac{d}{2}\right)^2} - \frac{1}{\left(y + \frac{d}{2}\right)^2} \right] \hat{y}$

ב.  $\vec{F} = kq^2 \left[ \frac{2}{r^2} - \frac{1}{(r+d)^2} - \frac{1}{(r-d)^2} \right] \hat{y}$

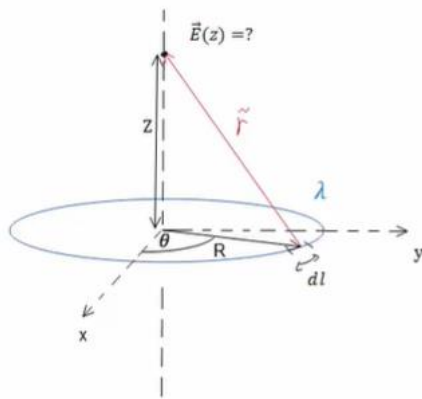
ג.  $\vec{F} = -\frac{6d^2 kq^2}{r^4} \hat{y}$

## התפלגות מטען רציפה:

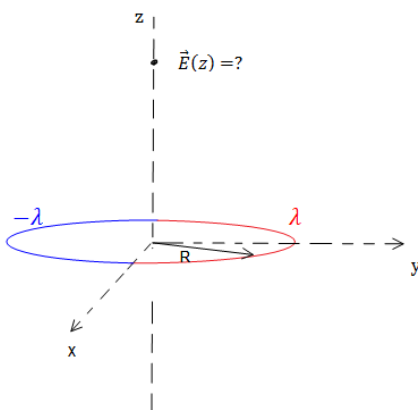
### שאלות:



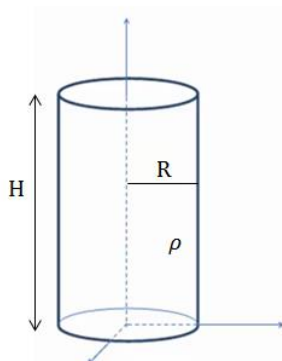
- (1) התפלגות מטען רציפה-תיל מכופף  
 תיל אינסופי הטעון בצפיפות מטען  
 ליחי' אורך  $\lambda$  מכופף לחצי מעגל  
 בעל רדיוס  $R$ .  
 מצא את השדה במרכז חצי המעגל.



- (2) שדה של טבעת ודיסקה  
 נתונה טבעת בעלת רדיוס  $R$  וצפיפות מטען  
 ליחידת אורך  $\lambda$ .  
 א. חשב את השדה של טבעת ברדיוס  $R$   
 הטעונה בצפיפות מטען ליחידת  
 אורך  $\lambda$  לאורך ציר הסימטריה של  
 הטבעת.  
 ב. חשב את השדה החשמלי של דיסקה  
 ברדיוס  $R$  הטעונה בצפיפות מטען  $\sigma$   
 לאורך ציר הסימטריה של הדיסקה.



- (3) טבעת חצי חצי  
 נתונה טבעת בעלת רדיוס  $R$ .  
 חציה האחד של הטבעת טעון בצפיפות  
 מטען  $\lambda$  וחציה השני טעון בצפיפות  $-\lambda$ .  
 מצא את השדה לאורך ציר הסימטריה  
 של הטבעת.



- (4) שדה של גליל מלא  
 גליל מלא בעל רדיוס  $R$  וגובה  $H$  טעון בצפיפות מטען  
 אחידה ליחידת נפח  $\rho$ .  
 מצא את השדה לאורך ציר הסימטריה של הגליל  
 (בתוך ומחוץ לגליל).

**(5) טבעת עם צפיפות לא אחידה**

טבעת ברדיוס R טעונה בצפיפות מטען משתנה התלויה בזווית עם ציר ה-x.

$$\lambda(\theta) = \lambda_0 \sin \theta$$

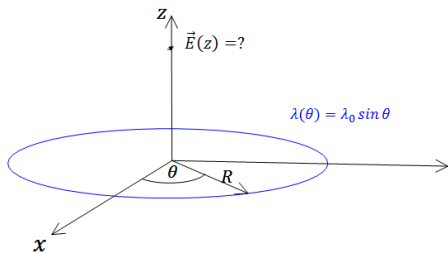
$\lambda_0$ , R קבועים נתונים.

א. מהו סך המטען על הטבעת?

ב. מצא את השדה החשמלי בכל נקודה על ציר הסימטריה של הטבעת (גודל וכיוון).

ג. מצא מהו השדה החשמלי עבור  $z \gg R$ .

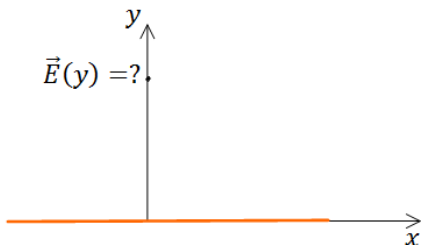
איזה שדה מאפיין מתקבל? ומדוע? (סעיף זה קשור לנושא של דיפולים).



**(6) שדה של תיל סופי**

תיל סופי באורך L טעון במטען כולל Q המפולג בצורה אחידה.

חשב את השדה החשמלי לאורך ציר המאונך לתיל והעובר במרכזו.

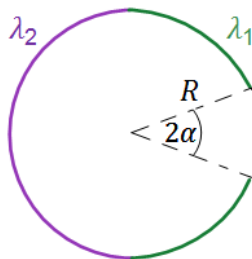


**(7) שדה של טבעת עם חלק חסר**

במערכת הבאה ישנה טבעת ברדיוס R שחציה הימני טעון בצפיפות מטען  $\lambda_1$  וחציה השמאלי טעון בצפיפות מטען  $\lambda_2$ .

לחציה הימני חסר חלק באורך קשת הנשען מול הזווית  $2\alpha$ .

מצא את השדה במרכז הטבעת.

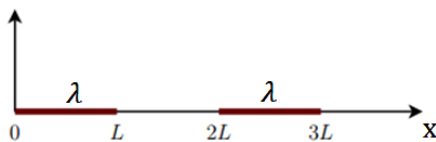


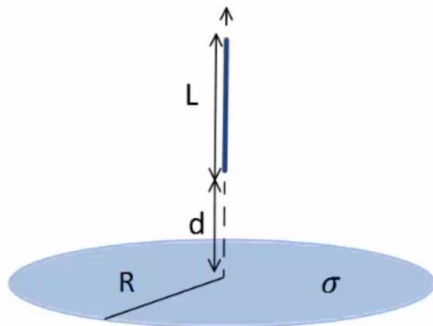
**(8) כוח של מוט על מוט**

שני מוטות בעלי אורך L טעונים בצפיפות מטען אחידה ליחידת אורך  $\lambda$ .

שני המוטות מונחים על ציר ה-x כפי שנראה בצירור.

מצא את הכוחות שמפעילים המוטות אחד על השני.



**(9) כוח של מוט על דסקה**

במערכת הבאה ישנה דסקה (מלאה) ברדיוס  $R$  הטעונה בצפיפות מטען אחידה ליחידת שטח  $\sigma$ . מוט באורך  $L$  מונח לאורך ציר הסימטריה של הדסקה ובגובה  $d$  מעל מרכזה (ראה איור). המוט טעון בצפיפות מטען אחידה ליחידת אורך  $\lambda$ . מצא מה הכוח שמפעיל המוט על הדסקה.

**(10) חרוט קטום\*\***

מטען  $q$  נמצא בקודקודו של משטח בצורת חרוט בעל חצי זווית מפתח השווה ל- $\theta$  ואורך הקו היוצר הוא  $l$  (ראו איור). החרוט טעון בצפיפות מטען אחידה ליחידת שטח  $\sigma$ .

א. האם ניתן לחשב את הכוח על המטען אם המטען נמצא ממש בקצה החרוט?

כעת מסירים את חציו העליון של החרוט כך שנשאר חרוט קטום.

ב. חשבו את הכוח הפועל על המטען מהחרוט. (הדרכה: השתמש בסופרפוזיציה של טבעות, השטח של טבעת אינפיניטסימלית בעובי  $dr$  הנמצאת במרחק  $r$  מקודקוד החרוט הוא:  $dS = 2\pi r \sin \theta dr$  בקואורדינטות כדוריות).

ג. עבור איזו זווית  $\theta$  הכוח מקסימאלי? מה קורה כאשר:  $\theta = \frac{\pi}{2}$ ?

## תשובות סופיות:

0 (1)

$$2\pi k\sigma z \left( \frac{1}{z} - \frac{1}{\sqrt{R^2 + z^2}} \right) \quad \text{ב.}$$

$$\frac{k\lambda R\pi z}{(R^2 + z^2)^{\frac{3}{2}}} \begin{cases} \hat{z} & z > 0 \\ -\hat{z} & z < 0 \end{cases} \quad \text{א. (2)}$$

$$2 \cdot \frac{-k\lambda R^2 2}{(R^2 + z^2)^{\frac{3}{2}}} \quad \text{(3)}$$

$$2\pi\sigma k \quad \text{(4)}$$

$$-\frac{k\pi\lambda_0 R^2}{z^3} \quad \text{ג.} \quad -\frac{k\pi\lambda_0 R^2}{(R^2 + z^2)^{\frac{3}{2}}} \quad \text{ב.} \quad 0 \quad \text{א. (5)}$$

$$\frac{kQ}{y \left( \left( \frac{L}{2} \right)^2 + y^2 \right)^{\frac{1}{2}}} \quad \text{(6)}$$

$$\frac{k}{R} [\lambda_1 (2 \sin \alpha - 2) + \lambda_2 \cdot 2] \quad \text{(7)}$$

$$kx^2 \ln \left| \frac{4}{3} \right| \quad \text{(8)}$$

$$2\pi k\sigma\lambda \left[ L - \left( \sqrt{R^2 + (L+d)^2} \right) - \sqrt{R^2 + d^2} \right] \quad \text{(9)}$$

(10) א. לא, כי המרחק בין המטען למטענים בקודקוק הוא אפס ואי אפשר לחשב

כוח כאשר המרחק הוא אפס. ב.  $\vec{F} = q\pi\sigma k \sin(2\theta) \ln 2 \cdot \hat{z}$

ג. החרוט הקטום הופך לדיסקה עם חור והשדה במרכז מתאפס.

# פיזיקה קלאסית 2 (לפיזיקאים)

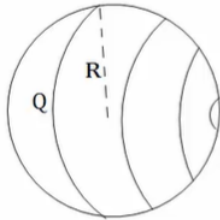
פרק 3 - חוק גאוס

תוכן העניינים

1. הסברים בסיסיים ..... 9
2. תרגול נוסף ..... 12

## הסברים בסיסיים:

### שאלות:



- (1) שדה של קליפה כדורית נתונה קליפה כדורית בעלת רדיוס  $R$ . מצא את השדה.



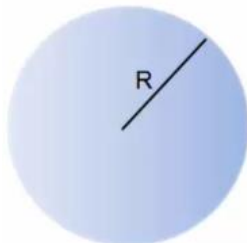
- (2) שדה של תיל אינסופי נתון תיל אינסופי בעל צפיפות  $\lambda$ . מצא את השדה במרחב.



- (3) שדה של גליל אינסופי נתון גליל אינסופי בעל צפיפות מטען ליחידת נפח  $\rho$  ורדיוס  $R$ . מצא את השדה במרחב.



- (4) שדה של לוח אינסופי נתון משטח אינסופי בעל צפיפות מטען ליחידת שטח  $\sigma$ . מצא את השדה במרחב.



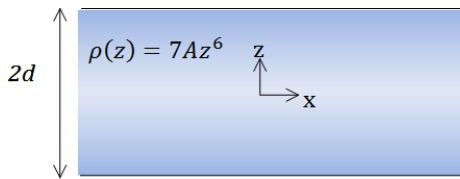
- (5) שדה של כדור עם צפיפות לא אחידה נתון כדור בעל רדיוס  $R$  וצפיפות התלויה במרחק ממרכז הכדור  $r$  קבוע ונתון:  $\rho(r) = \rho_0 \frac{r}{R}$ . מצא את התפלגות השדה במרחב (בתוך ומחוץ לכדור).



- (6) לוח עם עובי נתון מישור בעל שטח  $A$  ועובי  $d$ . המישור טעון בצפיפות מטען קבועה ליחידת נפח  $\rho$ .

- א. מצא את השדה רחוק מאוד מהמישור.  
 ב. מצא את השדה קרוב מאוד למישור ובתוכו (השתמש בקירובים).  
 ג. מניחים אלקטרון בגובה  $Z_0 < \frac{d}{2}$ , מצא את מיקום האלקטרון כפונקציה של הזמן בהנחה שצפיפות המטען במישור חיובית.

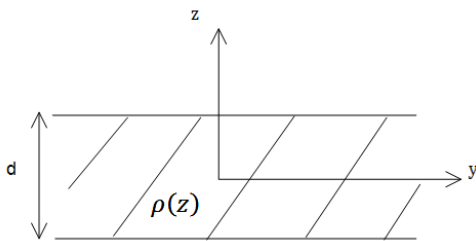
**(7) מישור עבה עם צפיפות משתנה**



מישור אינסופי בעובי  $2d$  טעון בצפיפות מטען משתנה  $\rho(z) = 7Az^6$ , כאשר  $A$  קבוע נתון. ציר ה- $z$  אנך למישור וראשיתו במרכז המישור (המישור אינסופי ב- $x, y$ , ראה ציור).

- א. מצא את השדה החשמלי בכל המרחב.
- ב. הראה שחוק גאוס הדיפרנציאלי מתקיים בכל המרחב.
- ג. מצא את הרוטור של השדה החשמלי  $\vec{\nabla} \times \vec{E}$  בכל המרחב, והסבר את התוצאה.

**(8) מישור עבה עם צפיפות אנטי סימטרית**



מישור אינסופי בעל עובי  $d$  טעון בצפיפות מטען כתלות במרחק ממרכז המישור  $\rho(z) = Az$ ,  $A$  קבוע נתון. מצא את השדה החשמלי בכל המרחב שיוצר המטען במישור.

## תשובות סופיות:

$$\vec{E} = \begin{cases} 0 & r < R \\ \frac{KQ}{r^2} \hat{r} & R < r \end{cases} \quad (1)$$

$$\vec{E} = \frac{2k\lambda}{r} \hat{r} \quad (2)$$

$$\vec{E} = \frac{\rho r}{2\epsilon_0} \hat{r} \quad (3)$$

$$\vec{E} = \begin{cases} \frac{\sigma}{2\epsilon_0} \hat{z} & z > 0 \\ -\frac{\sigma}{2\epsilon_0} \hat{z} & z < 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$\vec{E} = \begin{cases} \frac{kQ_{in}}{r^2} \hat{r} & r > R \\ \frac{\rho_0}{4\pi\epsilon_0} r^2 \hat{r} & r < R \end{cases} \quad (5)$$

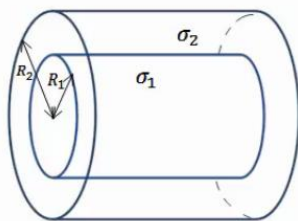
$$z(t) = A \cos\left(\sqrt{\frac{|e|\rho}{\epsilon_0 m}} t\right) \quad \text{ג.} \quad \vec{E} = \begin{cases} \frac{\rho d}{2\epsilon_0} \hat{z} & z > \frac{d}{2} \\ -\frac{\rho d}{2\epsilon_0} \hat{z} & z < -\frac{d}{2} \end{cases} \quad \text{ב.} \quad \vec{E} = \frac{kpdA}{r^2} \hat{r} \quad \text{א.} \quad (6)$$

$$\text{ג. שאלת הוכחה.} \quad \text{ב. שאלת הוכחה.} \quad \vec{E} = \frac{1}{\epsilon_0} A \cdot z^7 \hat{z} \quad \text{א.} \quad (7)$$

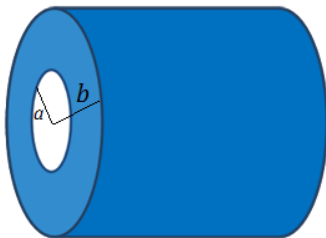
$$\vec{E} = -\frac{A}{\epsilon_0 z} \left[ \left(\frac{d}{2}\right)^2 - z^2 \right] \hat{z} \quad (8)$$

## תרגול נוסף:

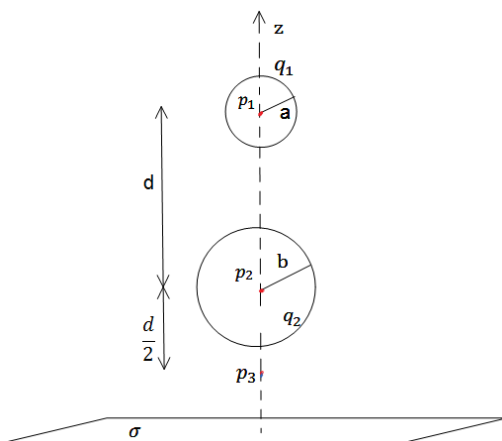
### שאלות:



- (1) שתי קליפות גליליות חלולות נתונות שתי קליפות (חלולות) גליליות אינסופיות בעלות ציר סימטריה משותף. רדיוס הקליפה הפנימית הוא  $R_1$  וצפיפות המטען המשטחית בה היא  $\sigma_1$ . רדיוס הקליפה החיצונית הוא  $R_2$  וצפיפות המטען בה היא  $\sigma_2$ . מצא את השדה החשמלי בכל המרחב.

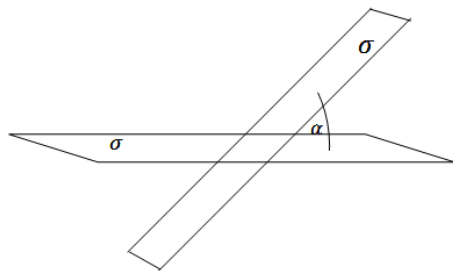


- (2) קליפה גלילית עבה בעלת רדיוס פנימי  $a$ , רדיוס חיצוני  $b$  וגובה  $H$  טעונה בצפיפות מטען נפחית  $\rho(r) = \frac{c}{r}$ , כאשר  $c$  קבוע נתון ו- $r$  הוא המרחק מציר הסימטריה של הקליפה. א. מצא את המטען הכולל בקליפה. ב. מצא את השדה בכל המרחב אם:  $H \gg a, b$ .



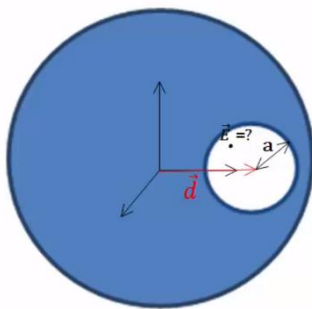
- (3) משטח ושתי קליפות כדוריות שתי קליפות כדוריות בעלות רדיוסים שונים  $a < b$ , נמצאות במרחק  $d > 2b$  אחת מעל השנייה. הקליפות טעונות במטענים  $q_1, q_2$  בהתאמה. במאונך לציר המחבר בין הקליפות ומתחת לקליפה התחתונה (עם רדיוס  $b$ ) מונח מישור אינסופי הטעון בצפיפות מטען ליחידת שטח  $\sigma$ . מצא את השדה בנקודות הבאות.
- א. הנמצאת במרכז הקליפה בעלת רדיוס  $a$ .
  - ב. הנמצאת במרכז הקליפה בעלת רדיוס  $b$ .
  - ג. הנמצאת במרחק  $\frac{d}{2}$  מתחת למרכז הקליפה התחתונה אך מעל המישור.

**(4) שני מישורים בזווית**



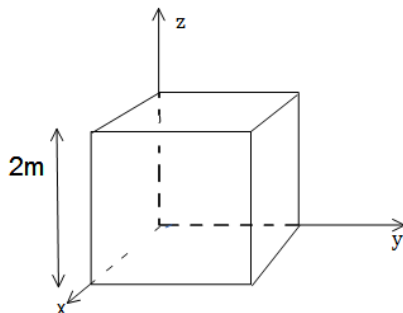
שני מישורים אינסופיים טעונים בצפיפות מטען ליחידת שטח  $\sigma$ . המישורים נמצאים בזווית  $\alpha$  אחד מהשני.  
 א. מצא את השדה החשמלי בין המישורים ומעל המישור האופקי.  
 ב. מצא את השדה מעל שני המישורים.

**(5) כדור עם חור**



בתוך כדור הטעון בצפיפות מטען אחידה  $\rho$  קיים חלל כדורי בעל רדיוס  $a$ . המרחק של מרכז החלל ממרכז הכדור הוא  $d$ . מצא את השדה החשמלי בתוך החלל.

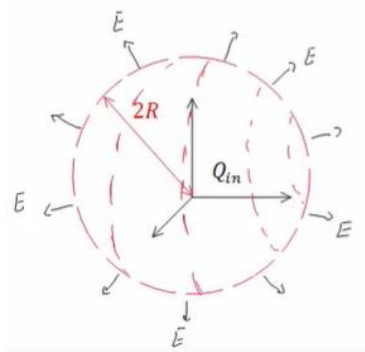
**(6) שטף דרך קובייה**



נתון שדה במרחב:  $\vec{E} = -6x\hat{x} + (2-3y)\hat{y}$ .

א. חשב את השטף העובר דרך צלעות קובייה הנמצאת ברביע הראשון כך שאחד מקדקודיה בראשית ואורך צלעה  $2m$ .  
 ב. מהו המטען הכלוא בתוך הקובייה?

**(7) מטען כלוא**

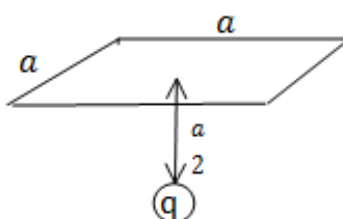


נתונה פונקציית השדה החשמלי

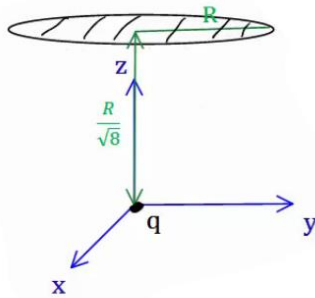
במרחב:  $\vec{E} = \frac{\rho_0 R^3}{\epsilon_0 (r^2 + R^2)} \hat{r}$

כאשר  $R$ ,  $\rho_0$  קבועים נתונים, ו- $r$  הוא המרחק מהראשית בקואורדינטות כדוריות, מצא את כמות המטען הכלואה בתוך מעטפת כדורית בעלת רדיוס  $2R$ .

**(8) שטף דרך משטח ריבועי**

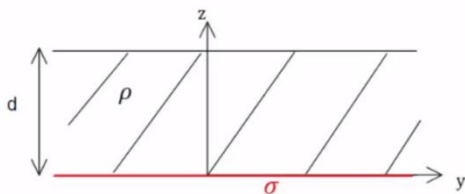


מצא את השטף העובר דרך משטח ריבועי (לא טעון) בעל צלע באורך  $a$  הנמצא בגובה  $\frac{a}{2}$  מעל מטען נקודתי  $q$ .



**9) שטף דרך מעגל**

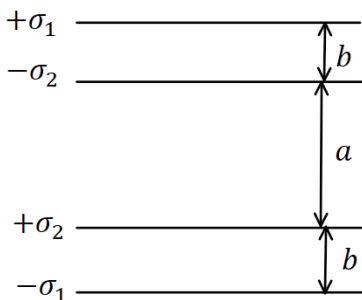
מטען  $q$  נמצא בראשית הצירים.  
 מהו השטף החשמלי העובר דרך עיגול ברדיוס  $R$   
 המקביל למישור  $x-y$  ומרכזו נמצא  
 בנקודה  $\left(0,0,\frac{R}{\sqrt{8}}\right)$ ?



**10) מישור עבה צמוד למישור דק**

מישור אינסופי דק בעל צפיפות מטען אחידה  $\sigma$  נמצא על מישור  $x-y$ .  
 מישור אינסופי נוסף בעל עובי  $d$  טעון בצפיפות מטען אחידה  $\rho$ , מונח מעל המישור הדק (תחתית המישור העבה נמצא גם על מישור  $x-y$ ).  
 מצא את השדה החשמלי בכל המרחב.

**11) ארבעה לוחות**



במערכת הבאה ישנם ארבעה לוחות הטעונים בצפיפויות מטען  $\sigma_1 = 0.05 \frac{c}{m^2}$ ,  $\sigma_2 = 0.02 \frac{c}{m^2}$ .  
 המרחקים בין הלוחות הם:  $a = 3 \text{ c.m}$ ,  $b = 1 \text{ c.m}$ .  
 כפי שמצוין בציור וניתן להניח כי מרחקים אלו קטנים בהרבה מצלעות הלוחות.

- א. מצא את השדה החשמלי בכל מקום במרחב (בין הלוחות ומעליהן, אין צורך להתייחס למה שקורה בצידי הלוחות).
- ב. משחררים פרוטון ממנוחה מהלוח  $-\sigma_2$ . כמה אנרגיה קינטית "ירוויח" מן המערכת? (הנח שהפרוטון עובר דרך הלוחות ללא הפרעה).
- ג. מצא את מהירות הפרוטון ביציאה מן המערכת.

**12) מלוח אל לוח**

שני לוחות ריבועיים נמצאים אחד מעל השני. אורך הצלע של כל לוח היא  $6 \text{ ס"מ}$  והמרחק בין הלוחות הוא  $2 \text{ מ"מ}$ . הלוחות טעונים בצפיפות מטען אחידה. המטען הכולל על הלוח התחתון הוא:  $Q = 6 \cdot 10^{-6} \text{ c}$  והמטען הכולל על הלוח העליון זהה בגודלו והפוך בסימנו. משחררים אלקטרון ממנוחה קרוב מאוד ומתחת ללוח העליון:  $(q_e = -1.6 \cdot 10^{-19} \text{ c}, m_e = 9.1 \cdot 10^{-31} \text{ kg})$ .

- א. כמה זמן ייקח לאלקטרון להגיע אל הלוח התחתון?
- ב. מהי מהירותו בזמן פגיעתו בלוח?
- ג. מהי האנרגיה הקינטית של האלקטרון ברגע הפגיעה?

## תשובות סופיות:

$$\vec{E} = (\sigma_1 R_1 + \sigma_2 R_2) \frac{1}{\epsilon_0 r} \hat{r} \quad (1)$$

$$\vec{E} = \frac{C(b-a)}{\epsilon_0 r} \hat{r} \quad (2)$$

$$\vec{E} = \frac{\sigma}{2\epsilon_0} \hat{z} + 0 + \left( -\frac{kq_1}{d^2} \hat{z} \right) \quad \text{ב.} \quad \vec{E} = \frac{\sigma}{2\epsilon_0} \hat{z} + \frac{kq_2 \hat{z}}{d^2} + 0 \quad \text{א.} \quad (3)$$

$$\vec{E} = \frac{\sigma}{2\epsilon_0} \hat{z} - \frac{kq_2}{4} \hat{z} - \frac{kq_1}{4} \hat{z} \quad \text{ג.}$$

$$\vec{E}_T = \frac{\sigma}{2\epsilon_0} ((1 + \cos \alpha) + \sin \alpha \hat{y}) \quad \text{בין המישורים:} \quad (4)$$

$$\vec{E}_T = \frac{\sigma}{2\epsilon_0} ((1 + \cos \alpha) - \sin \alpha \hat{y}) \quad \text{מעל המישורים:}$$

$$\vec{E} = \frac{\rho}{3\epsilon_0} \vec{d} \quad (5)$$

$$\frac{Q_{in}}{\epsilon_0} \quad \text{ב.} \quad -24 \quad \text{א.} \quad (6)$$

$$\frac{16}{5} \pi \rho_0 R^3 \quad (7)$$

$$\frac{q}{6\epsilon_0} \quad (8)$$

$$\phi = \int_{-\frac{a}{2}}^{\frac{a}{2}} \int_{-\frac{a}{2}}^{\frac{a}{2}} \frac{kqa}{2 \left( x^2 + y^2 + \left( \frac{a}{2} \right)^2 \right)^{\frac{3}{2}}} dx dy \quad (9)$$

$$\frac{q}{3\epsilon_0} \quad (10)$$

$$v = 1.04 \cdot 10^8 \frac{m}{sec} \quad \text{ג.} \quad 2.53 \cdot 10^{-11} J \quad \text{ב.} \quad \vec{E} = -5.65 \cdot 10^9 \frac{N}{C} \hat{y} \quad \text{א.} \quad (11)$$

$$V(t) = 3.65 \cdot 10^9 \frac{m}{sec} \quad \text{ב.} \quad t \approx 1.1 \cdot 10^{-12} sec \quad \text{א.} \quad (12)$$

$$E_k = 6.06 \cdot 10^{-12} J \quad \text{ג.}$$

# פיזיקה קלאסית 2 (לפיזיקאים)

פרק 4 - פוטנציאל

תוכן העניינים

16	1. מהו פוטנציאל
17	2. שיטה 1, סופרפוזיציה
18	3. שיטה 2, שאלות חוק גאוס
20	4. שיטה 3, חישוב מפורש
21	5. תרגילים נוספים

## מהו פוטנציאל:

### שאלות:

(1) עבודה להביא מטען מהאינסוף

מהי העבודה הדרושה להביא מטען  $Q = 2 \cdot 10^{-6} \text{ c}$

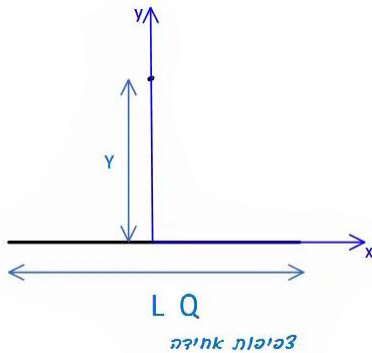
מהאינסוף למרחק  $r = 50 \text{ c.m}$  ממטען  $Q = 3 \cdot 10^{-6} \text{ c}$   
המקובע במקום?

### תשובות סופיות:

$$W = 108 \cdot 10^{-3} \text{ J} \quad (1)$$

## שיטה 1, סופרפוזיציה:

### שאלות:

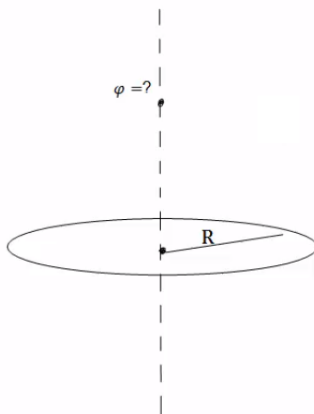


#### (1) שיטה ראשונה, סופרפוזיציה

תיל באורך  $L$  טעון במטען כולל  $Q$  המפולג בתיל בצורה אחידה. התיל מונח על ציר ה- $x$ . מצא את הפוטנציאל על ציר ה- $y$  העובר במרכז התיל.

#### (2) פוטנציאל של טבעת לאורך ציר הסימטריה

מצא את הפוטנציאל של טבעת ברדיוס  $R$  עם צפיפות מטען ליחידת אורך  $\lambda$  לאורך ציר הסימטריה.



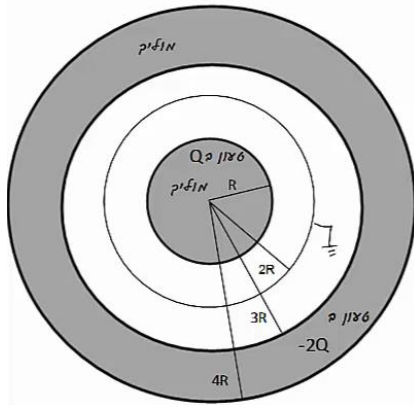
### תשובות סופיות:

$$\varphi = k\lambda \ln \left| \frac{\frac{L}{\alpha} + \sqrt{\left(\frac{L}{2}\right)^2 + y^2}}{-\frac{L}{\alpha} + \sqrt{\left(\frac{L}{2}\right)^2 + y^2}} \right| \quad (1)$$

$$\varphi = \frac{2\pi k\lambda R}{\sqrt{R^2 + z^2}} \quad (2)$$

## שיטה 2, שאלות חוק גאוס:

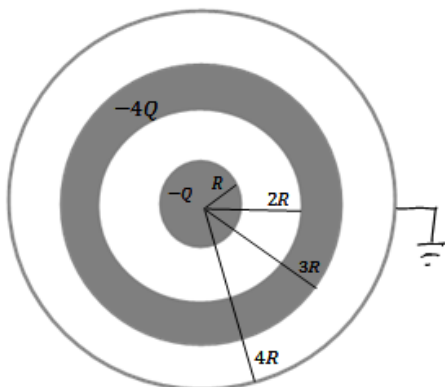
### שאלות:



- (1) דרך שניה, שאלות חוק גאוס  
 כדור מוליך בעל רדיוס  $R$  טעון במטען  $Q$ .  
 מסביב לכדור ברדיוס  $2R$ , נמצאת מעטפת כדורית דקה, מוליכה ומוארקת.  
 כל המערכת מוקפת במעטפת עבה ומוליכה עם רדיוס פנימי  $3R$  ורדיוס חיצוני  $4R$ .  
 המעטפת החיצונית טעונה במטען  $-2Q$  (ראה ציור).  
 לכדור ולמעטפות מרכז משותף,  $Q$ ,  $R$  נתונים.  
 א. מהו הפוטנציאל בכל המרחב?  
 ומהי התפלגות המטען בכל המרחב?

- (2) פוטנציאל של קליפה כדורית  
 מצא את הפוטנציאל בכל המרחב של קליפה כדורית ברדיוס  $R$  הטעונה במטען כולל  $Q$ . הנח שהמטען מפוזר בצורה אחידה על השפה.

### (3) קליפות גליליות מוליכות



- גליל מוליך בעל רדיוס  $R$  ואורך  $L$  טעון במטען  $-Q$ .  
 סביב הגליל נמצאת קליפה גלילית עבה ומוליכה, בעלת רדיוס פנימי  $2R$  ורדיוס חיצוני  $3R$ .  
 אורך הקליפה הוא  $L$  גם כן.  
 הקליפה טעונה במטען כולל של  $-4Q$ .  
 מסביב לקליפה העבה נמצאת קליפה דקה מוליכה ומוארקת ברדיוס  $4R$  ואורך זהה.  
 הנח כי  $L \gg R$  ולקליפות ציר מרכזי משותף.  
 א. כיצד מתפלג המטען במערכת?  
 ב. מה הפוטנציאל בכל המרחב?  
 ג. פרוטון בעל מסה  $m_p$  ומטען  $|e|$  משוחרר ממנוחה במרחק  $r=2R$ .  
 מהי מהירות הפרוטון לאחר שעבר מרחק  $R$ ?

### (4) שדה ופוטנציאל של כדור מלא

- נתון כדור מלא בעל רדיוס  $R$  וצפיפות מטען נפחית אחידה  $p$ .  
 א. מצא את פונקציית השדה בכל המרחב.  
 ב. מצא את פונקציית הפוטנציאל בכל המרחב.

## תשובות סופיות:

$$\text{התפלגות: ראה סרטון} \quad \varphi = \begin{cases} C_1 & r < R \\ \frac{kQ}{r} + C_2 & R < r < 2R \\ \frac{k(Q+q)}{r} + C_3 & 2R < r < 3R \\ C_4 & 3R < r < 4R \\ \frac{k(q-Q)}{r} + C_5 & 4R < r \end{cases} \quad \text{א. פוטנציאל: (1)}$$

$$\varphi = \begin{cases} \frac{KQ}{R} & r < R \\ \frac{KQ}{r} & R > r \end{cases} \quad \text{(2)}$$

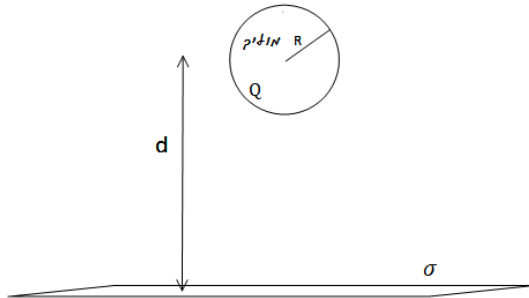
$$\varphi = \frac{Q}{2\pi L \epsilon_0} \cdot \begin{cases} \ln \frac{1}{2} + 5 \ln \frac{3}{4} & r < R \\ \ln \frac{r}{2R} + 5 \ln \frac{3}{4} & R < r < 2R \\ 5 \ln \frac{3}{4} & 2R < r < 3R \quad \text{ב.} \\ 5 \ln \frac{r}{4R} & 3R < r < 4R \\ 0 & 4R < r \end{cases} \quad \text{א. ראה סרטון (3)}$$

$$v = \sqrt{\frac{|e|Q \ln 2}{\pi L \epsilon_0 m_p}} \quad \text{ג.}$$

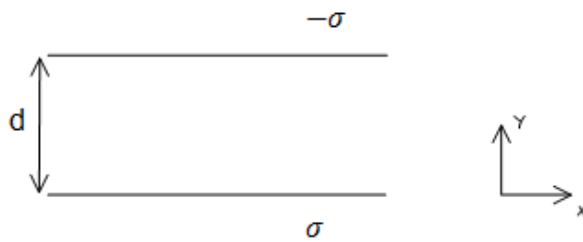
$$\varphi = \begin{cases} -\frac{\rho r^2}{6\epsilon_0} + C_1 & r < R \\ -\left(-\frac{\rho R^3}{3\epsilon_0 r}\right) + C_2 & R < r \end{cases} \quad \text{ב.} \quad E = \begin{cases} \frac{\rho r}{3\epsilon_0} \hat{r} & r < R \\ \frac{\rho R^3}{3\epsilon_0 r^2} \hat{r} & R < r \end{cases} \quad \text{א. (4)}$$

## שיטה 3, חישוב מפורש:

### שאלות:



- (1) **דרך שלישית, חישוב מפורש**  
 נתון משטח אינסופי הטעון בצפיפות מטען משטחית  $\sigma$ .  
 במרחק  $d$  מעל המשטח ממוקם כדור מוליך בעל רדיוס  $R$  ומטען  $Q$ .  
 מצא את הפרש הפוטנציאלים בין המישור לבין שפת הכדור.



- (2) **מתח בין לוחות**  
 מצא את הפרש הפוטנציאלים בין שני לוחות, כאשר לוח אחד טעון בצפיפות מטען אחידה ליחידת שטח  $\sigma$  והלוח השני טעון בצפיפות אחידה ליחידת שטח  $-\sigma$ .  
 נתון כי המרחק בין הלוחות הוא  $d$  וכי שטח הלוחות גדול בהרבה מהמרחק ביניהם.

### תשובות סופיות:

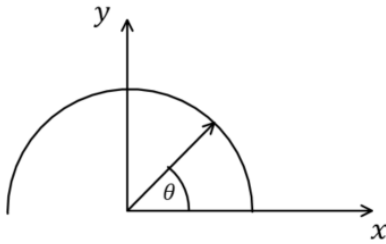
$$\Delta\varphi_{B \rightarrow A} = -\frac{\sigma}{2\epsilon_0}(d-R) + \frac{kQ}{R} - \left[ Q + \frac{KQ}{\lambda} \right] \quad (1)$$

$$V = |E|d \quad (2)$$

## תרגילים נוספים:

### שאלות:

#### (1) חישוב פוטנציאל במרכז חצי טבעת עם צפיפות משתנה



תיל מכופף לחצי טבעת ברדיוס  $R$ . מרכז הטבעת (או מרכז המעגל השלם) הוא בראשית הצירים וחצי הטבעת נמצאת בחלק החיובי של ציר ה- $y$  (ראו איור).

חצי הטבעת טעונה בצפיפות מטען לא אחידה ליחידת אורך:  $\lambda(\theta) = \lambda_0 \sin \theta$  כאשר  $\theta$

והיא הזווית עם ציר ה- $x$  החיובי ו- $\lambda_0 = 2 \cdot 10^{-12} \frac{C}{m}$ .

מצאו את הפוטנציאל בראשית.

#### (2) יצירת היסוד קיריום

בשנת 1944 המדענים גלן סיבורג (חתן פרס נובל לכימיה), ראלף גיימס ואלברט גיורסו ייצרו לראשונה את היסוד הכימי שמספרו 96 וקראו לו "קיריום" על שם מארי קירי. לשם כך הם "הפציצו" גרעינים של פלוטוניום (שמספרו האטומי 94, כלומר יש לו 94 פרוטונים) בגרעיני הליום – 4 (בהם יש 2 פרוטונים ושני נויטרונים), והמסה שלו היא:  $M = 6.6 \times 10^{-27} \text{ kg}$ .

א. אפשר להתייחס בקירוב אל גרעין הפלוטוניום כאל כדור

ברדיוס:  $R = 7 \times 10^{-15} \text{ m}$ , בו המטען של 94 הפרוטונים מפוזר באופן אחיד בנפחו.

אם כך, מה הפוטנציאל על פניו (יחסית לאינסוף)?

ב. מה צריכה להיות האנרגיה של גרעין ההליום בשביל שהוא יוכל להגיע אל פני גרעין הפלוטוניום?

תנו את התשובה גם ביחידות eV וגם ביחידות J.

ג. מה צריכה להיות המהירות שלו רחוק מהגרעין ("באינסוף")?

ד. באיזה מרחק ממרכז הגרעין המהירות שלו יורדת ל-80% מהמהירות בסעיף ג'?

**3 דיפול**

במרחב נמצאים שני מטענים :

$$\vec{r}_1 = -a\hat{y} = (-a, 0, 0) \text{ בנקודה } q_1 = -q$$

$$\vec{r}_2 = a\hat{y} = (a, 0, 0) \text{ בנקודה } q_2 = -q$$

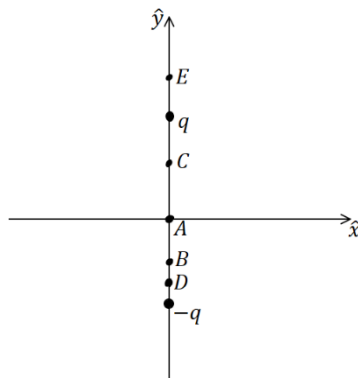
א. מה הפוטנציאל (יחסית לאינסוף), ומה השדה החשמלי בכל אחת מהנקודות

$$\text{הבאות: } \vec{r}_A = 0, \vec{r}_B = -\frac{1}{2}a\hat{y}, \vec{r}_C = \frac{1}{2}a\hat{y}, \vec{r}_D = -\frac{3}{4}a\hat{y}, \vec{r}_E = \frac{3}{2}a\hat{y} ?$$

ב. היכן הפוטנציאל (יחסית לאינסוף) מתאפס?  
תארו את המקום הגאומטרי של כל הנקודות  
בהן זה קורה.

ג. ציירו גרפים סכמתיים של הפוטנציאל לאורך  
ציר  $y$  ולאורך שני צירים שמקבילים לציר  $y$   
בשני מרחקים שונים.

ד. ציירו את קווי השדה ואת המשטחים שווי  
הפוטנציאל.

**4 מטען  $q$  ומטען  $3q$** 

במרחב נמצאים שני מטענים.

$$\text{מטען } 3q \text{ בנקודה } (a, 0, 0) \text{ ומטען } -q \text{ בנקודה } (-a, 0, 0).$$

א. מה הפוטנציאל  $\varphi$  (יחסית לאינסוף) ומה השדה  
החשמלי בראשית הצירים.

ב. מצאו על ציר  $x$  שתי נקודות בהן הפוטנציאל  
מתאפס.

ג. מה השדה החשמלי בשתי הנקודות שמצאתם  
בסעיף ב'?

ד. הראו שהמקום הגאומטרי של כל הנקודות בהן הפוטנציאל  
יחסית לאינסוף מתאפס הוא כדור.

מצאו את הרדיוס שלו ואת מרכזו (בשביל למצוא את הרדיוס והמרכז  
אפשר להיעזר בתוצאה של סעיף ב').

ה. מצאו איפה השדה החשמלי מתאפס. מה הפוטנציאל שם?

ו. ציירו גרף סכמתי של הפוטנציאל לאורך ציר  $x$ .

ציינו את המיקומים של נקודות בהן הפוטנציאל ידוע ואת ערכו בהן.

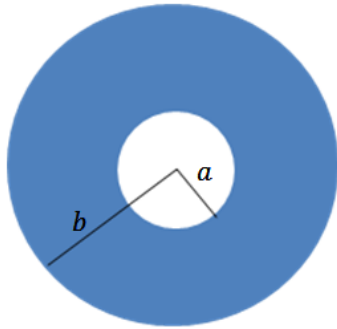
**5 מטען על השפה בצורה לא אחידה**

מטען  $Q$  מפוזר בצורה לא אחידה על שפה של קליפה כדורית ברדיוס  $R$ .

א. מה הפוטנציאל במרכז הקליפה?

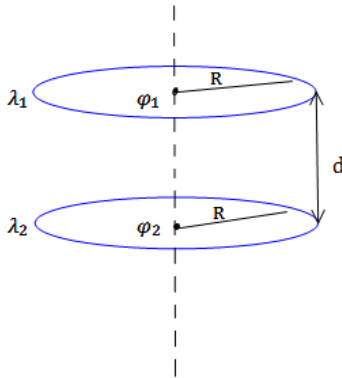
ב. האם ניתן לחשב את הפוטנציאל על השפה?

### 6 דסקה עם חור



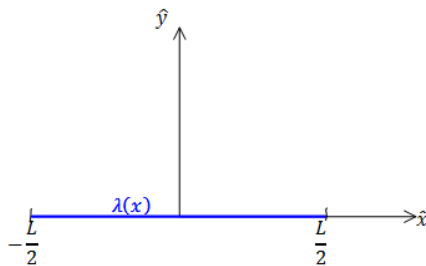
- בדסקה בעלת רדיוס  $b$  קדחו חור במרכזה ברדיוס  $a$ .  
 הדסקה טעונה בצפיפות מטען ליחידת שטח:  $\sigma(r) = \frac{D}{r^2}$ ,  $D$  קבוע לא נתון.  
 א. מצא את היחידות של  $D$ .  
 ב. מצא את  $D$  אם נתון גם המטען הכולל בדסקה  $Q$ .  
 ג. מצא את הפוטנציאל במרכז הדסקה.  
 ד. בדוק מה קורה בגבול של  $a \rightarrow b$ .

### 7 טבעת מעל טבעת



- שתי טבעות זהות בעלות רדיוס  $R$  מונחות האחת מעל ובמקביל לשנייה כך שהמרחק ביניהן הוא  $d$ .  
 הטבעת העליונה טעונה בצפיפות מטען ליחידת אורך  $\lambda_1$  ונתון כי הפוטנציאל במרכזה הוא  $\varphi_1$ .  
 הטבעת התחתונה טעונה בצפיפות מטען ליחידת אורך  $\lambda_2$  ונתון כי הפוטנציאל במרכזה הוא  $\varphi_2$ .  
 מצא את צפיפויות המטען של הטבעות אם נתון כי הפוטנציאל באינסוף מתאפס.

### 8 תיל עם צפיפות משתנה



- תיל דק מונח על ציר ה- $x$  כך שמרכזו בראשית הצירים. אורך התיל הוא  $L$  והוא טעון בצפיפות מטען ליחידת אורך:  $\lambda(x) = \lambda_0 \frac{x}{L}$ .  
 א. מצא את המטען הכולל בתיל.  
 ב. מצא את הפוטנציאל על ציר ה- $x$  למעט בתחום בו נמצא התיל.

### 9 כדור זז מחבר בין שני כדורים



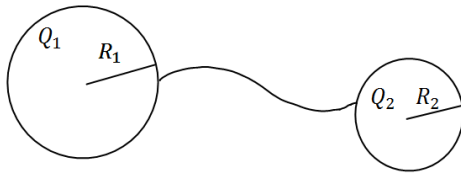
- הכדורים 1 ו-2 בתמונה הם מוליכים המקובעים במקומם וטעונים במטען זהה. הנח שהכדורים מאוד מרוחקים זה מזה וידוע שהכוח הפועל עליהם הוא  $F$ . הכדור השלישי גם הוא זהה אך אינו טעון. מצמידים את הכדור השלישי לכדור הראשון וממתינים עד שהמערכת תתייצב. לאחר מכן מנתקים את הכדור השלישי ומצמידים אותו לכדור השני. שוב ממתינים עד שהמערכת תתייצב. לבסוף מרחיקים את הכדור השלישי לגמרי. מהו הכוח בין הכדורים 1 ו-2 לאחר כל התהליך?

**10 שני כדורים מוליכים מחוברים בחוט**

שני כדורים מוליכים טעונים ונמצאים במרחק גדול מאוד זה מזה.

רדיוסי הכדורים והמטענים שלהם הם:  $R_1, R_2, Q_1, Q_2$ .

מחברים בין הכדורים באמצעות חוט מוליך.



א. מה יהיה המטען על כל כדור

לאחר זמן רב?

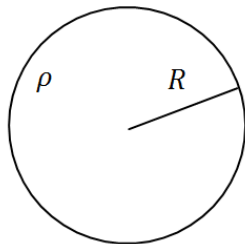
ב. כמה מטען זרם דרך החוט

ולאיזה כיוון?

**11 פוטנציאל של גליל מלא טעון בצפיפות אחידה**

מצא את הפוטנציאל בכל המרחב של גליל אינסופי

ברדיוס  $R$  וצפיפות מטען אחידה ונתונה  $\rho$ .



**12 חור במישור**

לוח אינסופי בעובי  $2d$  טעון בצפיפות מטען

אחידה וחיובית ליחידת נפח  $\rho$ .

בתוך הלוח ישנו חלל כדורי בקוטר  $d$ .

א. חשב את השדה החשמלי בנקודות:

$O(0,0), A(0, d), B(0.5d, 0.5d), C(0,0.5d)$

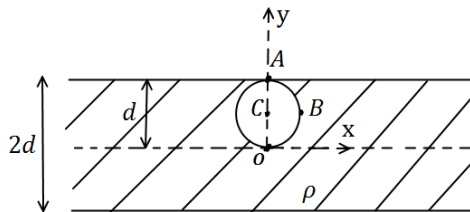
ב. מצא את הפרש הפוטנציאלים בין

הנקודות A ו-B.

ג. משחררים מטען  $q > 0$  בעל מסה  $m$  מהנקודה C.

i. לאיזה כיוון יתחיל לנוע המטען אם מתעלמים מהשפעת כוח הכובד?

ii. מהי מהירות המטען רגע לפני שהוא מגיע לדופן החלל?



**13 כדור מוליך מוקף בקליפה מבודדת**

כדור מוליך בעל רדיוס  $R_1$  טעון במטען  $Q_1$ .

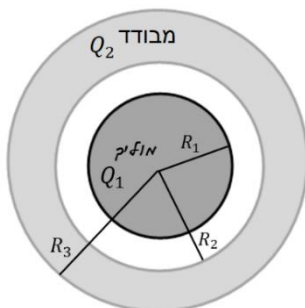
הכדור נמצא במרכזה של קליפה כדורית מבודדת

בעלת רדיוס פנימי  $R_2$  ורדיוס חיצוני  $R_3$ .

הקליפה טעונה באופן הומוגני במטען  $Q_2$ .

א. חשב השדה החשמלי והפוטנציאל בכל המרחב.

ב. חזור על החישוב הזה במקרה שבו הכדור מוארק.



## תשובות סופיות:

$$3.6 \cdot 10^{-2} \quad (1)$$

$$6.17 \cdot 10^{-12} \text{ J} \quad \text{ב.} \quad 1.93 \cdot 10^7 \text{ V} \quad \text{א.} \quad (2)$$

$$r = 1.95 \cdot 10^{-14} \text{ m} \quad \text{ד.} \quad v = 4.32 \cdot 10^7 \frac{\text{m}}{\text{sec}} \quad \text{ג.}$$

$$y = 0 \quad \text{ב.} \quad \text{א. ראה סרטון} \quad (3)$$

$$\text{ד. ראה סרטון} \quad \text{ג. ראה סרטון}$$

$$x_1 = -\frac{1}{2}a, x_2 = -2a \quad \text{ב.} \quad -\frac{k4q}{d^2} \hat{x} \quad \text{שדה חשמלי:} \quad \frac{2kq}{a} \quad \text{א. פוטנציאל:} \quad (4)$$

$$\left(-\frac{5}{4}a, 0, 0\right) \quad \text{מרכז:} \quad R = \frac{3}{4}a \quad \text{ד. רדיוס:} \quad x_1 = -\frac{kq}{a^2} \cdot \frac{16}{3} \hat{x}, x_2 = \frac{kq}{a^2} \cdot \frac{2}{3} \hat{x} \quad \text{ג.}$$

$$0.27 \frac{kq}{a} \quad \text{ה. איפוס השדה:} \quad x_2 = -3.73a \quad \text{הפוטנציאל בנקודה זו:}$$

ו. ראו סרטון.

$$\frac{kQ}{R} \quad \text{א.} \quad (5) \quad \text{ב. לא}$$

$$\varphi = \frac{kQ}{\ln \frac{b}{a}} \left( \frac{1}{a} - \frac{1}{b} \right) \quad \text{ג.} \quad D = \frac{Q}{2\pi \ln \frac{b}{a}} \quad \text{ב.} \quad [D] = [c] \quad \text{א.} \quad (6)$$

$$\frac{kQ}{a} \quad \text{ד.}$$

$$\varphi_1 = 2\pi k \lambda_1 + \frac{2\pi k \lambda_2 R}{\sqrt{R^2 + d^2}}, \quad \varphi_2 = 2\pi k \lambda_2 + \frac{2\pi k \lambda_1 R}{\sqrt{R^2 + (-d^2)}} \quad (7)$$

$$\varphi = \frac{k\lambda_0}{L} \left( -L + x \ln \left( \frac{x + \frac{L}{2}}{x - \frac{L}{2}} \right) \right) \quad \text{ב.} \quad 0 \quad \text{א.} \quad (8)$$

$$\frac{3}{8} F \quad (9)$$

$$q_2' = \frac{R_2(Q_1 + Q_2)}{R_1 + R_2} \quad \text{א.} \quad (10) \quad \text{ב. אם } \frac{Q_1}{Q_2} > \frac{R_1}{R_2} \quad \text{אז המטען עבר משמאל לימין,}$$

$$\text{אם } \frac{Q_1}{Q_2} < \frac{R_1}{R_2} \quad \text{אז עבר מימין לשמאל.}$$

$$\varphi = \begin{cases} -\frac{\rho}{4\epsilon_0}(r^2 - R^2) & r \leq R \\ -\frac{\rho R^2}{2\epsilon_0} \ln \frac{r}{R} & r \geq R \end{cases} \quad (11)$$

$$\vec{E}_O = \frac{\rho d}{6\epsilon_0} \hat{z}, \quad \vec{E}_A = \frac{5\rho d}{6\epsilon_0} \hat{z}, \quad \vec{E}_B = \frac{\rho d}{6\epsilon_0} \hat{x}, \quad \vec{E}_C = \frac{\rho d}{2\epsilon_0} \hat{z}. \quad \text{א. (12)}$$

$$V = \sqrt{\frac{2q\rho d^2}{3\epsilon_0 m}} \quad \text{ii.} \quad \text{ג. i. למעלה.} \quad \frac{3\rho d}{8\epsilon_0} \quad \text{ב.}$$

$$\vec{E} = \begin{cases} 0 & r < R_1 \\ \frac{kQ_1}{r^2} \hat{r} & R_1 < r < R_2 \\ \frac{k}{r^2} \left( Q_1 + Q_2 \left( \frac{r^3 - R_2^3}{R_3^3 - R_2^3} \right) \right) \hat{r} & R_2 < r < R_3 \\ \frac{k(Q_1 + Q_2)}{r^2} \hat{r} & R_3 < r \end{cases} \quad \text{א. (13)}$$

$$\varphi(r) = \begin{cases} C_1 & r < R_1 \\ \frac{kQ_1}{r} + C_2 & R_1 < r < R_2 \\ \frac{kQ_1}{r} - \frac{kQ_2 r^2}{2(R_3^3 - R_2^3)} - \frac{kQ_2 R_2^3}{(R_3^3 - R_2^3)r} + C_3 & R_2 < r < R_3 \\ \frac{k(Q_1 + Q_2)}{r} + C_4 & R_3 < r \end{cases} \quad \text{ב.}$$

# פיזיקה קלאסית 2 (לפיזיקאים)

פרק 5 - דיפול חשמלי

תוכן העניינים

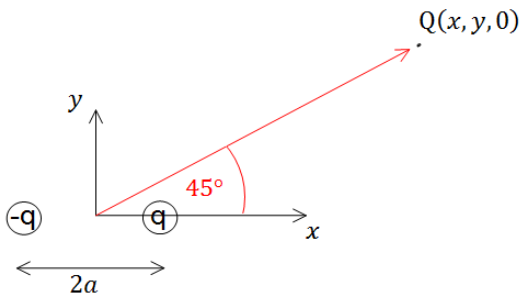
1. הכל על דיפול ..... 27

## הכל על דיפול:

### שאלות:

#### 1) תרגיל ופיתוח הנוסחה של דיפול מהשדה

שני מטענים בעלי מטען  $q$  ו- $-q$  ממוקמים  $x=a$  ו- $x=-a$ .



א. חשב את הכוח הפועל על מטען

שלישי  $Q$  הנמצא בנקודה  $(x, y, 0)$ .

ב. הנח שמרחק המטען מהראשית

גדול בהרבה מהמרחק בין

המטענים והזווית של וקטור

מיקום המטען עם ציר ה- $x$  הוא  $45^\circ$ .

השתמש בתשובה של סעיף א' ובקירובים

וחשב מה הכוח הפועל על המטען.

ג. חשב את וקטור מומנט הדיפול שיוצרים המטענים.

ד. חשב שוב את הכוח הפועל על המטען, הפעם השתמש בנוסחה של שדה של

דיפול והראה כי התשובה זהה לתשובה של סעיף ב'.

#### 2) דיפול בראשית מזיז אלקטרון

נתון דיפול  $\vec{p} = (p, 0, 0)$  הנמצא בראשית.

א. מצא את הגודל  $p$  כך שאלקטרון הממוקם בנקודה  $(a, 0, 0)$  עם

מהירות  $(v, 0, 0)$  ייעצר בנקודה  $(b, 0, 0)$ .

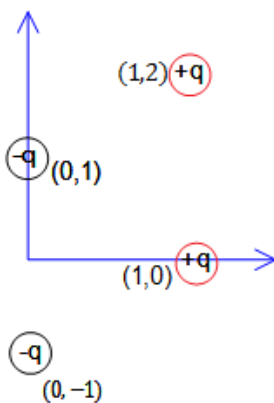
ב. מצא את הגודל  $p$  כך שאלקטרון הממוקם בנקודה  $(a, -\sqrt{2}a, 0)$  עם

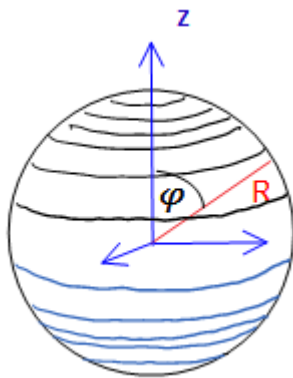
מהירות  $(0, 0, v)$  יבצע תנועה מעגלית.

#### 3) מציאת מומנט דיפול של מערכת

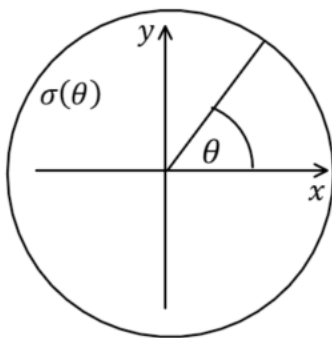
מצא את מומנט הדיפול החשמלי של התפלגות

המטענים המתוארת בצירור.

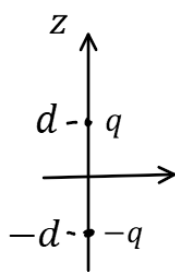




- 4) **מציאת מומנט דיפול של מערכת** (באותו הסרטון כמו השאלה הקודמת)  
מצא את מומנט הדיפול של קליפה כדורית הטעונה בצפיפות מטען משטחית לא אחידה  $\sigma = \sigma_0 \cos \varphi$  כאשר  $\sigma_0$  קבוע נתון ו- $\varphi$  היא הזווית עם ציר ה-z.



- 5) **דיסקה עם התפלגות מטען שתלויה בזווית**  
דיסקה מלאה בעלת רדיוס R טעונה בצפיפות מטען ליחידת שטח  $\sigma(\theta)$ .  
מצא את השדה החשמלי במרחק z מעל מרכז הדיסקה בגבול בו  $z \gg R$ :  
א. במקרה בו  $\sigma(\theta) = \sigma_0 \sin(\theta)$ .  
ב. במקרה בו  $\sigma(\theta) = \sigma_0 \sin(2\theta)$  רק עד הסדר של הדיפול.



- 6) **חישוב שגיאה**  
מטען q נמצא ב- $(0,0,d)$  ומטען -q נמצא ב- $(0,0,-d)$ .  
א. חשב את הפוטנציאל המדויק בנקודה כלשהיא על ציר z.  
ב. מהו הערך המינימלי של z כך שהקירוב של הפוטנציאל של דיפול לא יסטה יותר מאחוז אחד מהפוטנציאל האמיתי?  
ג. מהו הערך המינימלי של z כך שהקירוב של השדה של דיפול לא יסטה יותר מאחוז אחד מהשדה האמיתי?

- 7) **מטען נקודתי ודיפול (כולל אנרגיה וכוח)**  
דיפול חשמלי בעל מומנט דיפול  $\vec{p}$  נמצא במיקום  $\vec{r}$ . מטען נקודתי q נמצא בראשית. התייחס ל-q,  $\vec{p}$  ו- $\vec{r}$  כנתונים.  
א. חשב את מומנט הכוח שפועל על הדיפול.  
ב. חשב את האנרגיה של הדיפול.

ג. הראה כי הכוח הפועל על הדיפול הוא: 
$$\vec{F} = \frac{k(\vec{p} \cdot \vec{r}^2 - (\vec{p} \cdot \vec{r}) \cdot \vec{r})}{r^5}$$

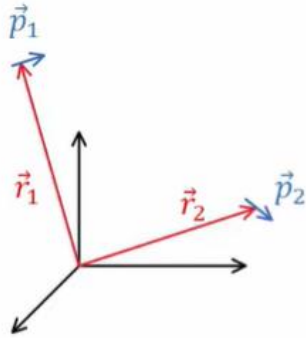
### 8) אנרגיית דיפול-דיפול

דיפול  $\vec{p}_1$  ממוקם ב- $\vec{r}_1$  ודיפול  $\vec{p}_2$  ממוקם ב- $\vec{r}_2$ .

א. הראה שהאנרגיה של  $\vec{p}_2$  בשדה של  $\vec{p}_1$  היא:

$$U = \frac{k}{\tilde{r}^3} [\vec{p}_1 \cdot \vec{p}_2 - 3(\vec{p}_1 \cdot \tilde{\vec{r}})(\vec{p}_2 \cdot \tilde{\vec{r}})]$$

כאשר  $\tilde{\vec{r}} = \vec{r}_2 - \vec{r}_1$ ,  $\tilde{r} = |\tilde{\vec{r}}|$ , ו- $\tilde{\hat{r}} = \frac{\tilde{\vec{r}}}{\tilde{r}}$ .



ב. אנרגיה זו היא בעצם אנרגיה של מערכת דיפול-דיפול, הראה שאם היינו מחשבים את האנרגיה של  $\vec{p}_1$  בשדה של  $\vec{p}_2$  היינו מקבלים תוצאה זהה.

ג. מצא את הכוח הפועל על  $\vec{p}_2$  והכוח על  $\vec{p}_1$ .

ד. מה שווה הכוח על  $\vec{p}_2$  במקרה ש- $\vec{p}_2$  מקביל ל- $\vec{p}_1$  ומקביל ל- $\tilde{\vec{r}}$ ?

ומה הכוח אם  $\vec{p}_2$  מקביל ל- $\vec{p}_1$  ומאונך ל- $\tilde{\vec{r}}$ .

## תשובות סופיות:

$$\vec{E} = kq \left[ \left( \frac{x-a}{((x-a)^2 + y^2)^{\frac{3}{2}}} - \frac{x+a}{((x+a)^2 + y^2)^{\frac{3}{2}}} \right) \hat{x} + \left( \frac{y}{((x-a)^2 + y^2)^{\frac{3}{2}}} - \frac{y}{((x+a)^2 + y^2)^{\frac{3}{2}}} \right) \hat{y} \right] \quad \text{א. (1)}$$

ב.  $\frac{kq}{r^3} (a\hat{x} + 3a\hat{y})$       ג.  $q2a\hat{x}$       ד. שאלת הוכחה.

א.  $\rho = \frac{mv^2}{2e^k} \left( \frac{a^2 b^2}{b^2 - a^2} \right)$       ב.  $|e| \frac{K\sqrt{2}p}{3\sqrt{3}a^3}$       (2)

0      (3)

$\left( 0, 0, \frac{4}{3} \sigma_0 R^3 2\pi \right)$       (4)

א.  $-\frac{k\pi r_0 R^3 \hat{y}}{3z^3}$       ב. 0      (5)

א.  $\varphi(q) = \frac{kq2d}{z^2 - d^2}$       ב.  $z_{\min} = 10d$       ג.  $z_{\min} \approx 14.14d$       (6)

א.  $\frac{kq}{r^3} (\vec{p} \cdot \vec{r})$       ב.  $-\frac{kq}{r^3} (\vec{p} \cdot \vec{r})$       ג. שאלת הוכחה      (7)

א. שאלת הוכחה      ב. שאלת הוכחה      (8)

ג.  $\vec{F}_1 = -\vec{F}_2$  ,  $\vec{F}_2 = \frac{3k}{\tilde{r}^4} \left[ \vec{p}_1 \cdot \vec{p}_2 \cdot \tilde{\vec{r}} + (\vec{p}_2 \cdot \hat{\vec{r}}) \cdot \vec{p}_1 + (\vec{p}_1 \cdot \hat{\vec{r}}) \cdot \vec{p}_2 - 5(\vec{p}_1 \cdot \hat{\vec{r}})(\vec{p}_2 \cdot \hat{\vec{r}}) \hat{\vec{r}} \right]$

ד.  $\vec{F}_2 = -\frac{3K}{\tilde{r}^4} p_1 p_2 \hat{\vec{r}}$  :  $\vec{p}_1 \parallel \vec{p}_2 \perp \vec{r}$  ,  $\vec{F}_2 = -\frac{6K}{\tilde{r}^4} p_1 p_2 \hat{\vec{r}}$  :  $\vec{p}_1 \parallel \vec{p}_2 \parallel \vec{r}$

# פיזיקה קלאסית 2 (לפיזיקאים)

פרק 6 - מציאת התפלגות מטען

תוכן העניינים

31	.....	1. מציאת התפלגות מטען
32	.....	2. משוואת פואסון ולפלס

## מציאת התפלגות מטען:

### שאלות:

#### (1) מציאת צפיפות נפחית משטחית קווית ונקודתית

נתונה פונקציית הפוטנציאל הבאה במרחב (בקואורדינטות גליליות):

$$\varphi \begin{cases} Ar^2 & r < a \\ B \ln(r) + C & a < r < b \\ D \ln(r) & b < r \end{cases}$$

$A, B, C, D$  נתונים.

א. מצא קשר בין הקבועים.

ב. מצא את התפלגות המטען במרחב, כעת נתון כי עוטפים את כל המערכת

בגליל אינסופי מוליך מוארק ברדיוס  $c > b$ .

ג. מצא את פונקציית הפוטנציאל החדשה בכל המרחב.

#### (2) שדה התלוי בזווית

השדה החשמלי במרחב נתון ע"י הפונקציה הבאה בקואורדינטות כדוריות:

$$\vec{E} = \frac{C}{r} (\hat{r} + \cos \theta \hat{\theta} + \sin \theta \cos \varphi \hat{\varphi})$$

א. מצא את צפיפות המטען במרחב.

ב. מצא את כמות המטען הנמצאת בתוך כדור ברדיוס  $R$  ע"י אינטגרל על

צפיפות המטען.

ג. מצא שוב את כמות המטען הנמצאת בתוך כדור ברדיוס  $R$  ע"י חישוב של

השטף של השדה החשמלי ושימוש בחוק גאוס.

### תשובות סופיות:

(1) ראה סרטון.

$$\vec{E} = \frac{\varepsilon_0 C}{r^2} \left( 1 - \frac{\sin \theta}{\sin \varphi} + \frac{\sin \theta \cos 2\varphi}{\sin \varphi} \right) \quad \text{א.} \quad \text{ב. } 4\pi\varepsilon_0 cR \quad \text{ג. } 4\pi\varepsilon_0 cR \quad (2)$$

## משוואת פואסון ולפּלס:

### סיכום כללי:

$$\vec{\nabla}^2 \varphi = -\frac{\rho}{\epsilon_0} : \text{משוואת פואסון}$$

$$\vec{\nabla}^2 \varphi = 0 : \text{משוואת לפּלס}$$

הלפּלאסיאן של פונקציה סקלרית  $f$  כתלות בקואורדינטות קרטזיות:

$$\nabla^2 f = \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial z^2}$$

גליליות:

$$\nabla^2 f = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial f}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 f}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial z^2}$$

כדוריות:

$$\nabla^2 f = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial f}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \varphi} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left( \sin \varphi \frac{\partial f}{\partial \varphi} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \varphi} \frac{\partial^2 f}{\partial \theta^2}$$

כאשר  $\varphi$  היא הזווית עם ציר  $z$  לפעמים מסמנים את הלפּלאסיאן גם ב- $\Delta f$ .

### שאלות:

#### 1) דוגמה – שתי קליפות

- נתונות שתי קליפות כדוריות בעלות מרכז משותף ברדיוסים  $a$  ו- $b$  ( $a < b$ ). נתון כי הקליפה הפנימית מוארקת והחיצונית מוחזקת בפוטנציאל  $V$ .
- רשמו את משוואת לפּלס לכל תחום.
  - פתרו את המשוואה, השתמשו בתנאי השפה ומצאו את הפוטנציאל בכל תחום.
  - מהי התפלגות המטען על הקליפה המוארקת?

## תשובות:

$$\varphi(r) = \begin{cases} 0 & r < a \\ -\frac{abV}{r(b-a)} + \frac{bV}{b-a} & a < r < b \\ \frac{bV}{r} & b < r \end{cases} \quad \text{ב.} \quad \text{א.} \quad \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right) = 0 \quad (1)$$

$$\text{ג.} \quad \sigma(a) = \frac{-\epsilon_0 bV}{a(b-a)}$$

# פיזיקה קלאסית 2 (לפיזיקאים)

פרק 7 - אנרגיה הדרושה לבניית מערכת

תוכן העניינים

34	.....	1. הרצאה
35	.....	2. תרגילים

## הרצאה:

### שאלות:

#### (1) הסבר נוסחאות ודוגמה

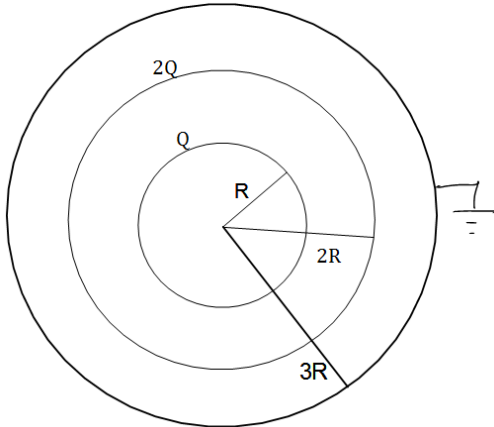
מצא את האנרגיה הדרושה לבניית קליפה כדורית בעלת רדיוס R וצפיפות מטען משטחית  $\sigma$ .

### תשובות סופיות:

$$U = \frac{1}{2} \frac{KQ^2}{R} \quad (1)$$

## תרגילים:

### שאלות:



#### 1) אנרגיה של מערכת שלוש קליפות

קליפה כדורית ברדיוס  $R$  טעונה במטען  $Q$  המפלג בצורה אחידה. הקליפה מוקפת קליפה נוספת ברדיוס  $2R$  הטעונה במטען  $2Q$ . שתי הקליפות מוקפות בקליפה שלישית מוליכה ומוארקת ברדיוס  $3R$ . מצא את האנרגיה הדרושה לבניית המערכת.

- 2) שתי טיפות מים כדוריות וזהות בעלות רדיוס  $R$  טעונות כל אחת במטען  $Q$  המפולג באופן אחיד על פניהן. מחברים את הטיפות ויוצרים טיפה אחת חדשה וגדולה שגם בה המטען מפולג באופן אחיד על השפה.
- מהי האנרגיה העצמית של הטיפות לפני שהתחברו?
  - מהי האנרגיה העצמית של הטיפה החדשה?
  - מהי האנרגיה העצמית של מערכת שתי הטיפות בדיוק לפני ההתחברות (כלומר, הטיפות כמעט נוגעות אחת בשניה)? הנח שהתפלגות המטען על כל טיפה עדיין אחידה.
  - מהו היחס בין האנרגיה שחישבת בסעיף ב' לסעיף ג'?

### תשובות סופיות:

$$\frac{KQ^2}{R} \quad (1)$$

$$\frac{KQ^2}{R} \quad (2) \quad \text{א.} \quad \frac{2KQ^2}{\sqrt[3]{2R}} \quad \text{ב.} \quad \frac{3}{2} \frac{KQ^2}{R} \quad \text{ג.} \quad \approx 1.058 \quad \text{ד.}$$

# פיזיקה קלאסית 2 (לפיזיקאים)

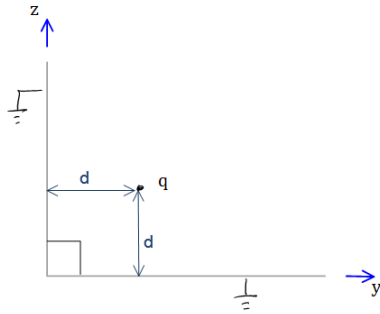
פרק 8 - מטעני דמות

תוכן העניינים

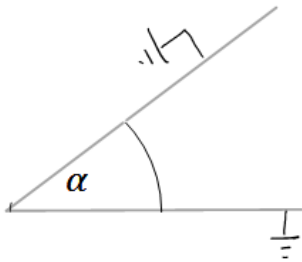
1. הרצאות ותרגילים ..... 36

## הרצאות ותרגילים:

### שאלות:



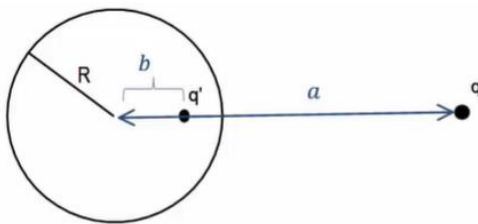
- (1) **לוחות בזווית 90 מעלות**  
נתונים שני מישורים מוארכים המחוברים בזווית ישרה. במרחק  $d$  משני המישורים ממוקם חלקיק בעל מטען  $q$  כמתואר בשרטוט. מצא את מטעני הדמות שמהם ניתן להסיק את פונקציית הפוטנציאל במרחב.



- (2) **לוחות בזווית אלפה**  
נתונים שני מישורים מוארכים המחוברים בזווית  $\alpha$ . במרחק  $d$  משני המישורים ממוקם חלקיק בעל מטען  $q$  כמתואר בשרטוט. מצא את מטעני הדמות שמהם ניתן להסיק את פונקציית הפוטנציאל במרחב.

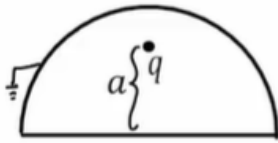
- (3) **מציאת התפלגות המטען על שפת המוליך**  
נתון מישור אינסופי מוארק. במרחק  $z$  מעל המישור נמצא חלקיק בעל מטען  $q$ . מצא את התפלגות המטען  $\sigma$  על שפת המישור.

- (4) **כוח ואנרגיה במטעני דמות**  
נתון מישור אינסופי מוארק ובמרחק  $z$  מעליו נמצא חלקיק בעל מטען  $q$ . מהו הכוח שמרגיש החלקיק?



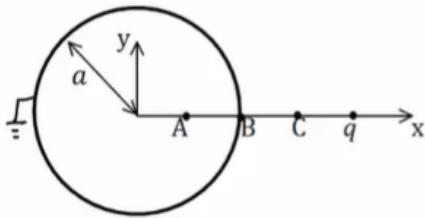
- (5) **מציאת התפלגות מטען עם ספירה**  
נתונה ספירה מוליכה ומוארכת ברדיוס  $R$ . מול הספירה ישנו מטען נקודתי  $q$  במרחק  $a$  ממרכז הספירה. מצא את התפלגות המטען על השפה של הספירה.

6) מטען בתוך חצי ספירה



מטען נקודתי  $q$  נמצא בתוך חצי ספירה כדורית, מוארקת ברדיוס  $R$ . המטען נמצא בגובה  $a$  מעל מרכז הספירה. מצא את מטעני הדמות בעזרתם נוכל לחשב את הפוטנציאל בכל המרחב.

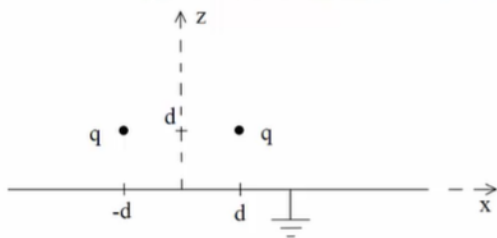
7) ספירה, מטען ושלוש נקודות



קליפה כדורית ברדיוס  $a$  מוארקת. מטען  $q$  נמצא במרחק  $2a$  ממרכז הקליפה ועל ציר ה- $x$  כך ש:  $x_A = \frac{a}{2}$ ,  $x_B = a$ ,  $x_C = \frac{3a}{2}$ .

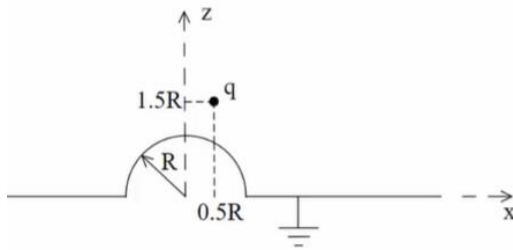
- א. מצא את הפוטנציאל בנקודות:  $A, B, C$ .
- ב. מהי התפלגות המטען המשטחית בנקודה  $B$ ?
- ג. מה הכוח הפועל על המטען  $q$ ?
- ד. מהי האנרגיה הדרושה לבניית המערכת?

8) שני מטענים מעל מישור



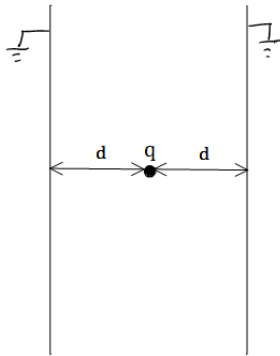
נתונים שני מטענים  $q$  במיקומים  $(d, 0, d)$  ו- $(-d, 0, d)$  מעל משטח אינסופי מוארק כבאיור.

- א. אילו מטעני שיקוף דרושים כדי לבטא פוטנציאל ושדה ב- $z > 0$ ?
- ב. איזה כוח ירגיש המטען הימני (גודל וכיוון)? יש לנרמל  $\frac{q^2}{4\pi\epsilon_0 d^2} = 1$  ולהגיע לתשובה מספרית.
- ג. מהי התפלגות המטען על המוליך? ומהו המטען הכולל על המוליך?
- ד. מהי האנרגיה הדרושה לבניית המערכת?

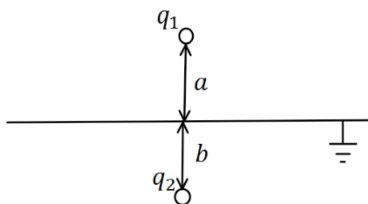


- 9) **מטען מעל חצי ספירה ולא במרכז**  
נתון חצי כדור מוליך מושלם בעל רדיוס R המונח על חצי מרחב מישור מוליך מושלם, כבאיור. מעל המוליך יש מטען q בקואורדינטה  $(0.5R, 0, 1.5R)$ .

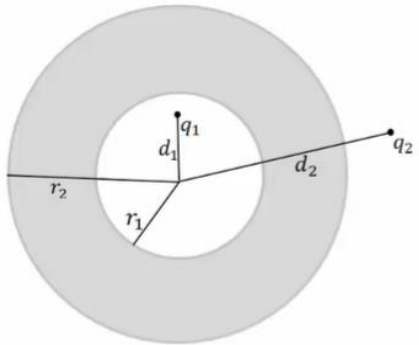
- א. מצא את גודל ומיקום מטעני השיקוף הדרושים בשביל לבטא את הפוטנציאל במרחב שמעל המבנה.  
ב. מצא את הפוטנציאל בנקודות  $(0, 0, 1.5R)$ ,  $(0, 0, 0.5R)$ .  
ג. מהי צפיפות המטען המשטחית על שפת המוליך בנקודה  $(\frac{\sqrt{3}R}{2}, 0, \frac{R}{2})$ ?  
ד. מה הכוח הפועל על המטען?  
ה. מהי האנרגיה הדרושה לבניית המערכת?



- 10) **מטען בין שני לוחות אינסופיים**  
נתונים שני לוחות אינסופיים מוארקים במרחק  $2d$  זה מזה. בדיוק באמצע ביניהם ממוקם חלקיק בעל מטען q כמתואר בשרטוט.  
א. מצא את פונקציית הפוטנציאל במרחב.  
ב. מצא את העבודה הדרושה לבניית המערכת.



- 11) **מטענים משני צידי מישור מוארק**  
מטען  $q_1$  נמצא במרחק a מעל מישור אינסופי מוארק. מטען  $q_2$  נמצא במרחק b מתחת למישור.  
א. מצא את השדה והפוטנציאל בכל המרחב.  
ב. מהי התפלגות המטען על המישור? ומהו המטען הכולל על המישור?



**12) קליפה עבה עם מטען בפנים ובחוץ**

נתונה קליפה כדורית עבה ומוליכה בעלת רדיוס

פנימי  $r_1$  ורדיוס חיצוני  $r_2$ .

מטען  $q_1$  נמצא במרחק  $d_1$  ממרכז הקליפה כך

ש-  $d_1 < r_1$ .

מטען  $q_2$  נמצא במרחק  $d_2$  ממרכז הקליפה כך

ש-  $d_2 > r_2$ .

המטענים לא נמצאים על אותו רדיוס.

א. מצא את הפוטנציאל בו נמצאת הקליפה.

ב. מצא את הכוח הפועל על המטען  $q_2$ .

ג. מהי האנרגיה הדרושה לבניית המערכת?

**13) דיפול מעל מישור**

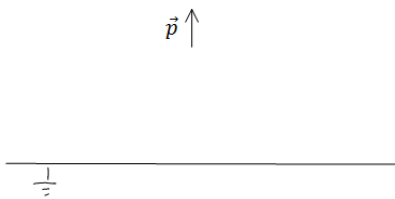
דיפול מונח במרחק  $z_0$  מלוח אינסופי מוארק.

מומנט הדיפול הוא:  $\vec{p} = (0, 0, p)$ .

א. מצא את השדה בכל המרחב.

ב. מצא את צפיפות המטען על המישור.

ג. מצא את סך המטען על המישור.



**14) ספירה נייטרלית**

מטען נקודתי  $q$  מונח במרחק  $a$  מספירה

מוליכה ברדיוס  $R$ .

הספירה אינה מוארקת ואינה מחוברת

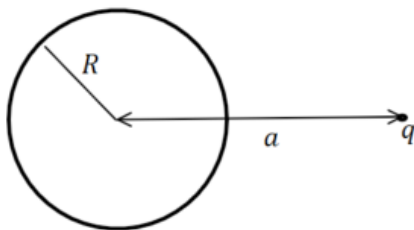
לפוטנציאל כלשהו.

ניתן להניח כי הספירה נייטרלית.

מהו הפוטנציאל על הספירה?

ומהם מטעני הדמות המתאימים לפתרון הבעיה?

רמז: השתמש בחוק שימור המטען.



## תשובות סופיות:

$$\varphi = \frac{kq}{r_1} - \frac{kq}{r_2} \quad (1)$$

ראה סרטון (2)

$$\sigma = -kq\varepsilon_0 \frac{2d}{(r^2 + d^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (3)$$

$$F = -\frac{q^2}{(2d)^2} \quad (4)$$

$$E(r, \theta) = \frac{kq(r - a \cos \theta)}{(r^2 + a^2 - 2ra \cos \theta)^{\frac{3}{2}}} + \frac{-kq \left( r \left( \frac{a}{R} \right)^2 - a \cos \theta \right)}{\left( R^2 + \left( \frac{ra}{R} \right)^2 - 2ra \cos \theta \right)^{\frac{3}{2}}} \quad (5)$$

ראה סרטון (6)

$$\vec{F} = \frac{2kq^2}{qa^2} (-\hat{x}) \quad \text{ג} \quad \sigma_B = \varepsilon_0 \left( -\frac{3kq}{a^2} \right) \quad \text{ב} \quad \varphi_A = \varphi_B = 0, \varphi_C = \frac{3kq}{2a} \quad \text{א} \quad (7)$$

$$U = \frac{-kq^2}{6a} \quad \text{ד} \quad (8)$$

$$-0.338\hat{z} + 0.162\hat{x} \quad \text{ב} \quad (-d, 0, d), (d, 0, -d) \quad \text{א} \quad (8)$$

$$Q_T = -2q, \quad \sigma = -\frac{1}{2\pi} qd \left( \frac{1}{((x-d)^2 + y^2 + d^2)^{\frac{3}{2}}} + \frac{1}{((x+d)^2 + y^2 + d^2)^{\frac{3}{2}}} \right) \quad \text{ג} \quad (9)$$

$$U = \frac{-kq^2}{\sqrt{2} \cdot 2d} \quad \text{ד} \quad (9)$$

$$q_3 = \sqrt{\frac{2}{5}}q, \vec{r}_3 = \left( \frac{R}{5}, 0, -\frac{3}{5}R \right), q_4 = -q, \vec{r}_4 = (0.5R, 0, -1.5R) \quad \text{א} \quad (9)$$

$$\frac{kq}{R^2} 1.04\varepsilon_0 \quad \text{ג} \quad 0 : (0, 0, 0.5R), \varphi \approx 0.71 \frac{kq}{R} : (0, 0, 1.5R) \quad \text{ב} \quad (9)$$

$$U = \frac{kq^2}{2R} (-0.7) \quad \text{ה} \quad \vec{F} = \frac{kq^2}{R^2} (-0.2, 0, -0.64) \quad \text{ד} \quad (9)$$

$$\frac{kq^2}{2d} (-\ln(2)) \quad \text{ב} \quad V_T = \frac{k(-1)^n q}{((x-2dn)^2 + y^2 + z^2)^{\frac{1}{2}}} \quad \text{א} \quad (10)$$

$$\sigma_T = \frac{-1}{2\pi} \left( \frac{q_1 a}{(r^2 + a^2)^{\frac{3}{2}}} + \frac{q_2 b}{(r^2 + a^2)^{\frac{3}{2}}} \right) \quad \text{ב.} \quad E_{wp} = \frac{kq_1}{|r_+|^2} \hat{r}_+ + \frac{-kq_1}{|r_-|^2} \hat{r}_- \quad \text{א. (11)}$$

$$\vec{F} = \frac{-k \frac{r_2}{d_2} q_2^2 \hat{r}}{\left(d_2 - \frac{r_2^2}{d_2}\right)^2} + \frac{k \left(q_1 + \frac{r_2 q_2}{d_2}\right) q_2 \hat{r}}{d_2^2} \quad \text{ב.} \quad \varphi_2(r_2) = \frac{kq_1}{r_2} + \frac{kq_2}{d_2} \quad \text{א. (12)}$$

$$U = \frac{1}{2} \left[ \frac{-k \frac{r_2}{d_2} q_2^2}{\left(d_2 - \frac{r_2^2}{d_2}\right)} + \frac{k \left(q_1 + \frac{r_2 q_2}{d_2}\right) q_2}{d_2} - \frac{kq_1^2 \cdot \frac{r_1}{d_1}}{\left(\frac{r_1^2}{d_1} - d_1\right)} + \frac{kq_1^2}{r_2} + \frac{kq_1 q_2}{d_2} \right] \quad \text{ג.}$$

$$\vec{E}_T = \frac{k(3p(z-z_0)r, 0, -pr^2 + 2p(z-z_0)^2)}{\left(r^2 + (z-z_0)^2\right)^{\frac{5}{2}}} + \frac{k(3p(z+z_0)r, 0, -pr^2 + 2p(z+z_0)^2)}{\left(r^2 + (z+z_0)^2\right)^{\frac{5}{2}}} \quad \text{א. (13)}$$

$$\text{ג.} \quad \sigma(r) = \frac{(-2pr^2 + 4pz_0^2)}{4\pi(r^2 + z_0^2)^{\frac{5}{2}}} \quad \text{ב.}$$

$$\varphi = \frac{kq}{a} \quad \text{פוטנציאל על הספירה: (14)}$$

מטעני הדמות הם:  $q' = -q \frac{R}{a}$  במיקום  $q' = q \frac{R}{a}$ ,  $b = \frac{R^2}{a}$  במרכז

# פיזיקה קלאסית 2 (לפיזיקאים)

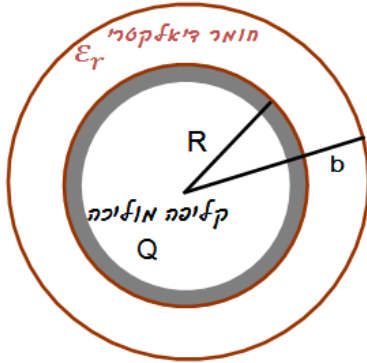
פרק 9 - חומרים דיאלקטריים

תוכן העניינים

42	.....	1. הרצאות ותרגילים בסיסיים
45	.....	2. תרגול נוסף

## הרצאות ותרגילים בסיסיים:

### שאלות:

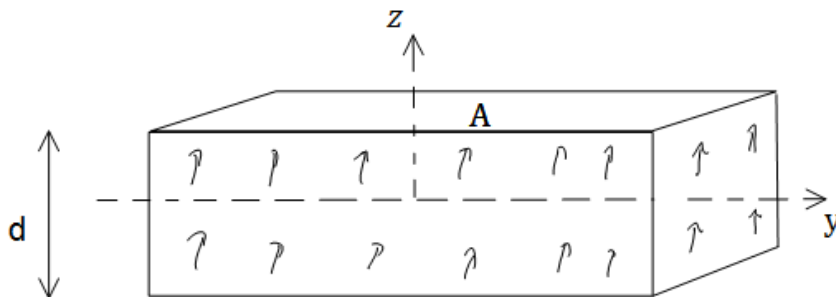


- (1) **חומר דיאלקטרי מסביב לקליפה מוליכה**  
קליפה מוליכה (דקה) ברדיוס R טעונה במטען Q. מסביב לקליפה נמצאת קליפה נוספת עבה עם רדיוס פנימי R ורדיוס חיצוני b. מצא את השדה בכל המרחב ואת התפלגות המטען המושרית (קשורה).

(2) **תיבה מקוטבת**

תיבה בעלת שטח A ועובי d מקוטבת עם צפיפות קיטוב נתונה:  $\vec{P} = P_0 \frac{z}{d} \hat{z}$ . כאשר ראשית הצירים במרכז התיבה.

- א. מצא את צפיפות המטען הקשורה (משטחית נפחית) בתיבה.  
ב. מצא את סך המטען הקשור בתיבה.



(3) **כדור מקוטב רדיאלית**

- כדור ברדיוס R מקוטב לפי:  $\vec{P} = A\vec{r}$  כאשר A קבוע ו- $\vec{r}$  הוא וקטור ממרכז הכדור. א. מצא את צפיפות המטען הקשורה (משטחית ונפחית).  
ב. מצא את השדה מחוץ ובתוך הכדור.

(4) **גליל מקוטב באופן אחיד**

- גליל מקוטב באופן אחיד ובמקביל לציר הסימטריה. רדיוס הגליל הוא R ואורכו L. חשב את התפלגות המטען הקשור וצייר את קווי השדה במקרים הבאים:

א.  $R \ll L$

ב.  $L \ll R$

ג.  $R \approx L$

**(5) שדה של כדור עם צפיפות קיטוב אחידה**

חשב את השדה של כדור מלא עם צפיפות קיטוב אחידה.  
הדרכה: חשב את צפיפות המטען הקשור.

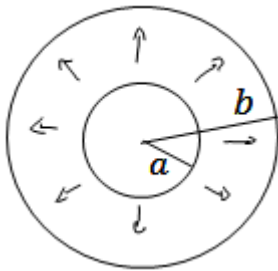
ניתן לתאר צפיפות מטען כזו באמצעות שני כדורים הטעונים בצפיפות מטען אחידה ליחידת נפח הנמצאים במרחק קטן אחד מהשני.  
מצא מה צריכה להיות הצפיפות של כל כדור (תלויה גם במרחק הקטן) ולאחר מכן חשב את השדה בכל המרחב כסופרפוזיציה של השדות של שני הכדורים.

**(6) קליפה כדורית דיאלקטרית**

קליפה כדורית בעלת רדיוס פנימי  $a$  ורדיוס חיצוני  $b$   
עשויה מחומר דיאלקטרי בעל צפיפות קיטוב

נתונה:  $\vec{P}(\vec{r}) = \frac{A}{r} \hat{r}$  כאשר  $A$  קבוע ו- $r$  הוא המרחק ממרכז הקליפה.

מצא את השדה בכל המרחב פעם בעזרת צפיפות המטען המושרה ופעם באמצעות השימוש בשדה ההעתקה.

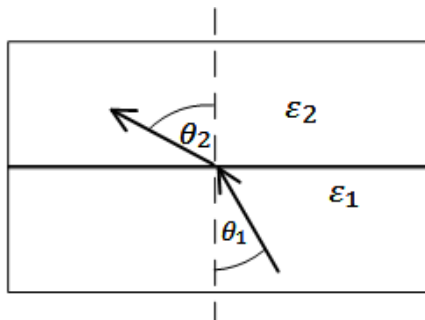


**(7) חוק סנל**

קרן אור מורכבת משדה חשמלי ושדה מגנטי המתקדמים במרחב, הראה כי אם קרן האור עוברת מחומר דיאלקטרי בעל מקדם  $\epsilon_1$  לחומר בעל מקדם דיאלקטרי  $\epsilon_2$  אז מתקיים חוק סנל (התעלם מהשדה המגנטי).

$$\tan \theta_1 = \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} \tan \theta_2$$

כאשר  $\theta_1$  היא זווית הפגיעה של הקרן עם האנך ו- $\theta_2$  היא זווית השבירה עם האנך בחומר.



## תשובות סופיות:

$$\vec{E}(r) = \begin{cases} 0 & r < R \\ \frac{kQ}{\epsilon_r r^2} \hat{r} & R < r < b \\ \frac{kQ}{r^2} & b < r \end{cases} \quad \text{(1) השדה במרחב:}$$

התפלגות המטען המושרית:  $\sigma_i(b) = \epsilon_0 \left( \frac{kQ}{b^2} - \frac{kQ}{\epsilon_r b^2} \right)$ ,  $\sigma_i(R) = \frac{\epsilon_0 kQ}{R^2} \left( \frac{1}{\epsilon_r} - 1 \right)$

(2) א. צפיפות המטען משטחית:  $\sigma_b = \frac{P_0}{2}$ , נפחית:  $\rho_b = -\frac{P_0}{d}$  ב. 0

(3) א. צפיפות המטען משטחית:  $\sigma_b = A \cdot R$ , נפחית:  $\rho_b = -3A$

ב. שדה בתוך הכדור:  $\vec{E} = \frac{Ar}{\epsilon_0} \hat{r}$ , מחוץ לכדור: 0.

(4) א.  $\vec{p} = qL\hat{z}$  ב.  $\vec{E} = \frac{P_0}{\epsilon_0} \hat{z}$  ג. ראה סרטון

$$\vec{E} = \begin{cases} -\frac{P_0}{3\epsilon_0} \hat{z} & r < R \\ \frac{k(3(\vec{p} \cdot \hat{r})\hat{r} - \vec{p})}{r^3} & r > R \end{cases} \quad \text{(5)}$$

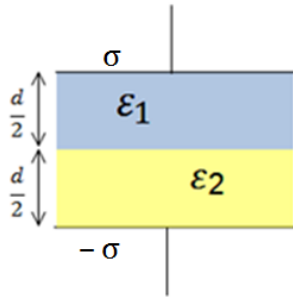
(6)  $\vec{E} = 0$

(7) שאלת הוכחה

## תרגול נוסף:

### שאלות:

#### (1) חומר דיאלקטרי מפוצל בין שני לוחות



שני לוחות אינסופיים נמצאים במרחק  $d$  ביניהם,

הלוח העליון טעון  $\sigma$  והלוח התחתון טעון  $-\sigma$ .

בין הלוחות ישנם שני סוגים של חומרים דיאלקטריים ליניאריים כפי שנראה בציור.

נתון המקדם הדיאלקטרי של כל חומר  $\epsilon_1$  ו- $\epsilon_2$ .

א. מצאו את וקטור העתקה  $D$  בכל אחד מהחומרים.

ב. מצאו את השדה החשמלי בכל מקום בין הלוחות.

ג. מצאו את הפולריזציה  $P$  בכל אחד מהחומרים.

ד. מצאו את הפרש הפוטנציאל בין הלוחות.

ה. מצאו את גודל ומיקום המטען הקשור בחומרים הדיאלקטריים.

ו. מצאו שוב את השדה בכל המרחב ע"י שימוש במטענים הקשורים והחופשיים.

#### (2) כדור דיאלקטרי טעון

כדור ברדיוס  $R$  מורכב מחומר דיאלקטרי ליניארי בעל קבוע דיאלקטרי אחיד  $\epsilon_r$ .

בתוך החומר הדיאלקטרי ישנה צפיפות של מטען חופשי (בנוסף לחומר הדיאלקטרי

עצמו) מפוזרת באופן אחיד ושווה ל- $\rho$ .

מצאו את השדה בכל המרחק. (רמז: מצאו קודם כל את  $D$ ).

#### (3) כדור מבודד וקליפה מוליכה

כדור מבודד ברדיוס  $R$  טעון בצפיפות מטען משתנה

$$\rho(r) = \rho_0 \frac{r}{R}$$

השווה ל- $\rho(r) = \rho_0 \frac{r}{R}$ . מסביב לכדור ישנה קליפה מבודדת עבה בעלת

רדיוס פנימי  $R$  ורדיוס חיצוני  $2R$ .

הקליפה עשויה מחומר דיאלקטרי עם מקדם

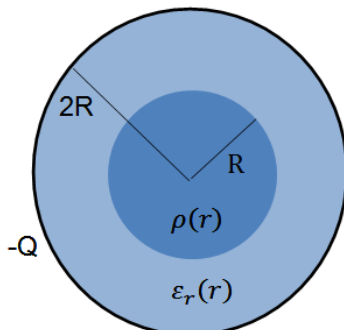
$$\epsilon_r(r) = 1 + \frac{r}{R}$$

דיאלקטרי משתנה:  $\epsilon_r(r) = 1 + \frac{r}{R}$ . מסביב לקליפה הדיאלקטרית ישנה קליפה מוליכה

דקה ברדיוס  $2R$  הטעונה במטען כולל  $-EQ$ .

א. מצא את וקטור העתקה  $\vec{D}$  בין כל המרחב.

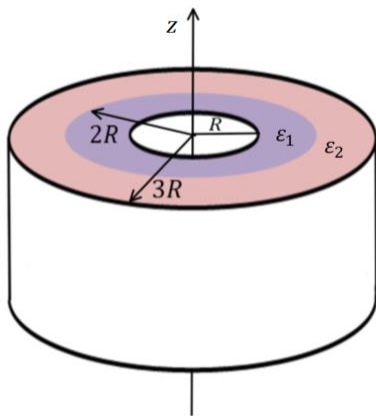
ב. מצא את השדה החשמלי בכל המרחב.



- ג. מהי צפיפות המטען המושרה (או קשור) בתוך החומר הדיאלקטרי (משטחית ונפחית)?
- ד. מצא באמצעות סכימה מפורשת על צפיפות המטען המושרה, את סך המטען המושרה.

#### 4) חישוב קיבול דרך אנרגיה

- קבל גלילי מורכב משתי קליפות גליליות ברדיוסים  $R$  ו- $3R$ , ובאורך  $L \gg 3R$ . ממלאים את הקבל (המרווח בין הקליפות) בחומרים דיאלקטריים. חומר בעל מקדם  $\epsilon_1$  ממלא את התווך בין  $R$  ל- $2R$  וחומר בעל מקדם  $\epsilon_2$  את התווך בין  $2R$  ל- $3R$ . טוענים את הקליפה הפנימית במטען  $Q$  ואת החיצונית במטען  $-Q$ .
- א. מהי צפיפות האנרגיה בתוך הקבל כתלות במרחק ממרכז הקבל?
- ב. מהי האנרגיה האגורה בקבל?
- ג. חשבו את הקיבול של הקבל מתוך סעיף ב'.
- ד. ניתן להתייחס לקבל כאל שני קבלים המלאים כל אחד בחומר דיאלקטרי שונה. האם הקבלים מחוברים בטור או במקביל? חשב את הקיבול של כל קבל.



## תשובות סופיות:

$$\vec{E} = \begin{cases} \frac{\sigma \hat{z}}{\varepsilon_1} & 0 < z < \frac{d}{2} \\ \frac{\sigma \hat{z}}{\varepsilon_2} & \frac{d}{2} < z < d \end{cases} \quad \text{ב.} \quad \vec{D} = \sigma \hat{z} \quad \text{א. (1)}$$

$$V = -\frac{d}{2} \sigma \left( \frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} \right) \quad \text{ד.} \quad \vec{p} = \begin{cases} \left( \sigma - \frac{\varepsilon_0 \sigma}{\varepsilon_1} \right) \hat{z} & 0 < z < \frac{d}{2} \\ \left( \sigma - \frac{\varepsilon_0 \sigma}{\varepsilon_2} \right) \hat{z} & \frac{d}{2} < z < d \end{cases} \quad \text{ג.}$$

$$\sigma_b(z=0) = \sigma \left( \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_1} - 1 \right), \quad \sigma_b \left( z = \frac{d}{2} \right) = \varepsilon_0 \sigma \left( \frac{1}{\varepsilon_2} - \frac{1}{\varepsilon_1} \right), \quad \sigma_b(z=d) = \sigma \left( 1 - \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_2} \right) \quad \text{ה.}$$

$$E_T = \frac{\sigma}{\varepsilon_1} \hat{z} \quad \text{ו.}$$

$$\vec{E} = \begin{cases} \frac{\rho r}{3\varepsilon_r \varepsilon_0} & r < R \\ \frac{k\rho 4\pi R^3}{3r^2} & r > R \end{cases} \quad \text{(2)}$$

$$\vec{E} = \begin{cases} \frac{\rho_0 r^2}{4R\varepsilon_0} \hat{r} & r < R \\ \frac{\rho_0 R^3 \hat{r}}{4r^2 \varepsilon_0 \left( \frac{r}{R} \right)} & R < r < 2R \quad \text{ב.} \\ \frac{\rho_0 \pi R^3 - Q}{4\pi r^2 \varepsilon_0} & 2R < r \end{cases} \quad \vec{D} = \begin{cases} \frac{\rho_0 r^2}{4r} \hat{r} & r < R \\ \frac{\rho_0 4\pi R^3}{16\pi r^2} \hat{r} & R < r < 2R \quad \text{א. (3)} \\ \frac{\rho_0 \pi R^3 - Q}{4\pi r^2} \hat{r} & 2R < r < \infty \end{cases}$$

$$\text{ו. ד.} \quad \sigma_b(r=2R) = \frac{\rho_0 R^2}{4(2R)(3)}, \quad \sigma_b(r=R) = \frac{-\rho_0 R}{8}, \quad \rho_b = \frac{-\rho_0 R^2}{4r^2 \left( 1 + \frac{r}{R} \right)^2} \quad \text{ג.}$$

$$U = \frac{Q^2}{4\pi L} \left( \frac{1}{\varepsilon_1} \ln 2 + \frac{1}{\varepsilon_2} \ln \frac{3}{2} \right) \quad \text{ב.} \quad u = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{(2\pi r L)^2} \begin{cases} \frac{1}{\varepsilon_1} & R < r < 2R \\ \frac{1}{\varepsilon_2} & 2R < r < 3R \end{cases} \quad \text{א. (4)}$$

$$c_1 = \frac{2\pi L \varepsilon_1}{\ln 2}, \quad c_2 = \frac{2\pi L \varepsilon_2}{\ln \frac{3}{2}} \quad \text{ד.} \quad C = \frac{2\pi L}{\frac{1}{\varepsilon_1} \ln 2 + \frac{1}{\varepsilon_2} \ln \frac{3}{2}} \quad \text{ג.}$$

# פיזיקה קלאסית 2 (לפיזיקאים)

פרק 10 - מעגלי זרם ישר

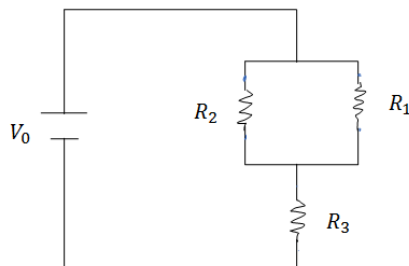
תוכן העניינים

- 48 ..... 1. זרם, חוק אוהם וחיבור נגדים
- 50 ..... 2. חוקי קירכופוף

## זרם, חוק אוהם וחיבור נגדים:

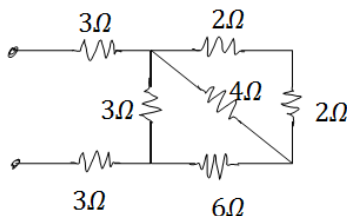
### שאלות:

#### (1) שנים במקביל אחד בטור



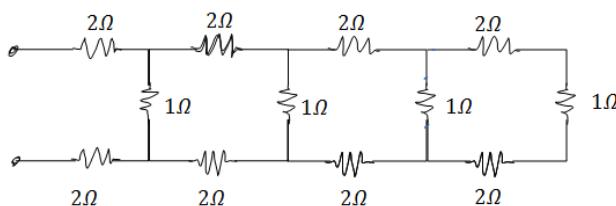
- במעגל הבא נתונים ההתנגדות של כל נגד ומתח המקור:  $R_1 = 2\Omega$ ,  $R_2 = 3\Omega$ ,  $R_3 = 5\Omega$ ,  $V_0 = 31V$ .
- מצא את ההתנגדות השקולה של המעגל.
  - מצא את הזרם העובר בסוללה.
- חשב את הזרם והמתח על כל אחד מהנגדים.

#### (2) מרובע עם אלכסון



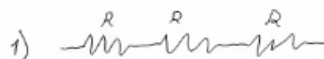
- חשב את ההתנגדות השקולה של המעגל הבא בין שני ההדקים.

#### (3) 4 חוליות



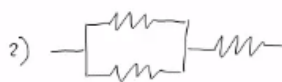
- מצא את ההתנגדות השקולה של המעגל בין שני ההדקים.

#### (4) שלושה נגדים



- נתונים שלושה נגדים זהים עם התנגדות ידועה  $R$ .

- מצא את כל האפשרויות השונות לחבר את הנגדים.



- מצא את ההתנגדות השקולה של כל אפשרות.



#### (5) שניים של 1 שניים של 2 ושניים של 3

- חשב את הזרם והמתח בכל נגד במעגל הבא:



## תשובות סופיות:

$$I_1 = 3A, I_2 = 2A, V_{1,2} = 3A, I_2 = 2A \quad \text{ב.} \quad R_T = \frac{31}{5} \Omega \quad \text{א. (1)}$$

$$\frac{90}{11} \quad \text{(2)}$$

$$R_T = \frac{985}{204} \quad \text{(3)}$$

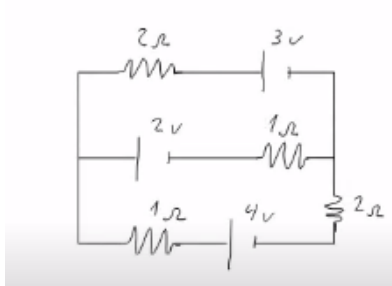
$$\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \quad \text{.iii} \quad \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad \text{.ii} \quad R_1 + R_2 + R_3 \quad \text{.i. א. (4)}$$

$$\frac{R}{3} \quad \text{.iii} \quad \frac{3}{2}R \quad \text{.ii} \quad 3R \quad \text{.i. ב.}$$

$$\text{נגד 1- מתח: } 2V \text{ זרם: } 2A, \text{ נגד 2- מתח: } 8V \text{ זרם: } 4A, \text{ נגד 3- מתח: } 27V \text{ זרם: } 9A. \quad \text{(5)}$$

## חוקי קירכהוף:

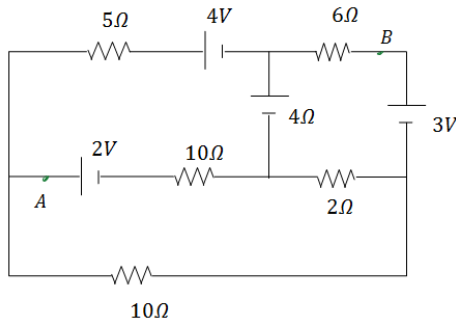
### שאלות:



#### 1) חוקי קירכהוף

- א. חשב את הזרם בכל נגד במעגל הבא.  
 ב. מצא את המתח  $V_{AB}$ .

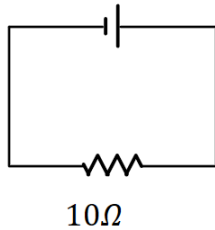
#### 2) חוגים



- א. חשב את הזרם בכל נגד במעגל הבא.  
 ב. מצא את המתח  $V_{AB}$ .

#### 3) דוגמה 1

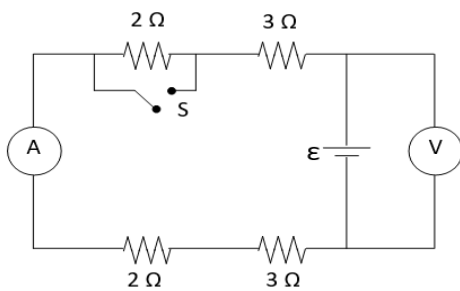
סוללה לא אידיאלית



- המעגל הבא מורכב מסוללה לא אידיאלית המחוברת לנגד של 10 אוהם. ההתנגדות הפנימית של הסוללה היא 1 אוהם. במעגל זרם של 2 אמפר.  
 א. מהו הכא"מ של הסוללה?  
 ב. מהו מתח ההדקים שמספקת הסוללה במעגל?

#### 4) דוגמה 2

- מחברים סוללה לא אידיאלית לנגד של 10 אוהם ומודדים את הזרם במעגל. המדידה מראה כי הזרם הוא 2 אמפר. לאחר מכן מנתקים את הסוללה מהנגד ומחברים אותה לנגד של 6 אוהם. מודדים שוב את הזרם במעגל ורואים כי הזרם השתנה ל-3 אמפר.  
 א. מצא את הכא"מ וההתנגדות הפנימית של הסוללה.  
 ב. מצא את מתח ההדקים של הסוללה בכל אחד מהחיבורים.



- 5) מעגל עם סוללה לא אידיאלית המעגל שבתרשים מכיל ארבעה נגדים, מד מתח ומד זרם אידיאלים, סוללה (לא אידיאלית) ומפסק. קריאת האמפרמטר נרשמה פעמיים, כאשר המפסק פתוח וכאשר המפסק סגור. אחת הקריאות הייתה 1.5A והאחרת הייתה 1.8A.

- א. האם הזרם הגבוה יותר נמדד כאשר המפסק היה פתוח או כאשר הוא היה סגור? נמק/י!  
 ב. מה הוראת מד המתח בשני מצבי המפסק? פרטי חישוביך!  
 ג. חשבי את הכא"מ ואת ההתנגדות הפנימית של הסוללה.  
 ד. מה היו מראים אותם שני מכשירי מדידה אילו היו מחברים את מד המתח במקום מד הזרם ולהפך? נמק!

### תשובות סופיות:

- 1) א.  $I_3 = \frac{5}{11} \text{ A}$ ,  $I_2 = \frac{7}{11} \text{ A}$ ,  $I_1 = \frac{2}{11} \text{ A}$   
 2) א.  $I_3 = -0.3876 \text{ A}$ ,  $I_2 = 0.0281 \text{ A}$ ,  $I_1 = -0.6584 \text{ A}$   
 3) א. 22V  
 4) א. התנגדות פנימית:  $r = 2R$ , כא"מ: 24V.  
 5) א. כאשר המפסק סגור. סגור-1.8A פתוח-1.5A  
 ג. התנגדות פנימית:  $r = 2R$  כא"מ: 18V  
 ב.  $V_{AB} = 3 + \frac{1}{11} \text{ V}$   
 ב.  $V_{AB} = -0.8766 \text{ V}$   
 ב. 20V  
 ב.  $V_2 = 18 \text{ V}$ ,  $V_1 = 20 \text{ V}$   
 ב.  $V_{AB} = 15 \text{ V}$   
 ד. הוולטמטר יראה  $V = 0$

# פיזיקה קלאסית 2 (לפיזיקאים)

פרק 11 - קבלים

תוכן העניינים

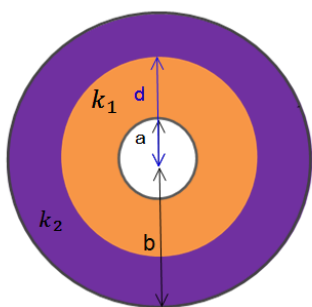
- 1. הסבר על קיבול ושיטות לחישוב קיבול ..... 52
- 2. אנרגיה האגורה בקבל וכוח על חומר דיאלקטרי ..... 54
- 3. תרגילים נוספים בקבלים ..... 57
- 4. טור אינסופי של קבלים ..... 66

## הסבר על קיבול ושיטות לחישוב קיבול:

### שאלות:

#### 1) קבל גלילי

קבל גלילי מורכב משתי קליפות גליליות מוליכות באורך  $L$  ורדיוסים  $a, b$ .

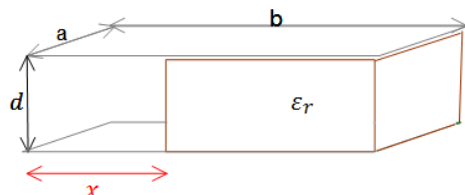


א. מצא את הקיבול של הקבל  $L \gg a, b$ .

ב. כעת ממלאים את הקבל בחומר דיאלקטרי בעל קבוע משתנה.

ג.  $k_1$  כאשר  $a < r < d$  ו- $k_2$  כאשר  $d < r < b$ . מצא את הקיבול החדש.

ד. טוענים את הקבל במטען  $Q$ , מצא את התפלגות המטען במרחב (חופשי ומושרה).



$$d \ll a, b$$

#### 2) דרך שניה לחשב קיבול וחיבור קבלים

קבל לוחות מורכב משני לוחות מלבניים בעלי

אורך  $b$  ורוחב  $a$ . המרחק בין הלוחות הוא  $d$ . לתוך הקבל מכניסים חומר דיאלקטרי הממלא את כל החלל בין הלוחות עד

למרחק  $x$  מקצה הלוחות. הקבוע הדיאלקטרי של החומר נתון  $\epsilon_r$ .

א. מצא את הקיבול של הקבל כתלות ב- $x$ .

ב. מחברים את הקבל למקור מתח  $V$ , מה תהיה התפלגות המטען החופשי על הלוחות? ומהי צפיפות המטען המושרה בחומר?

#### 3) קבל לוחות עם חומר דיאלקטרי התלוי בגובה

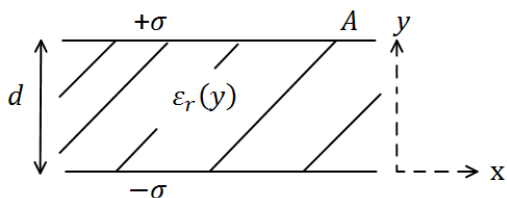
קבל לוחות טעון בצפיפות מטען  $\pm\sigma$ .

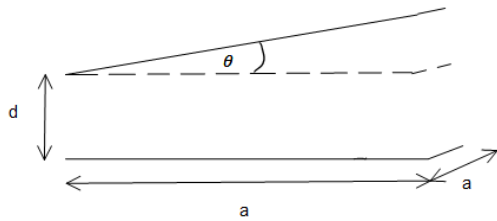
שטח הלוחות הוא  $A$  והמרחק בין הלוחות הוא  $d$ . בין הלוחות ישנו חומר דיאלקטרי בעל מקדם דיאלקטרי המשתנה עם המרחק

$$\epsilon_r(y) = 1 + \left(\frac{y}{d}\right)^2$$

בין הלוחות: כאשר הלוח התחתון נמצא ב- $y = 0$ .

מצא את הקיבול של הקבל.





#### 4 קבל לוחות בזווית

נתון קבל לוחות בעל שטח A ומטען Q.  
 אורך כל צלע בלוחות הקבל הינה a.  
 עקב טעות בייצור נוצרה זווית  $\theta$  קטנה  
 מאוד בין הלוחות.

- א. חשב את קיבולו של הקבל כפונקציה של  $\theta$ .  
 ב. מחברים את הקבל למקור מתח V, מצא את התפלגות המטען המשטחית על לוחות הקבל.

#### תשובות סופיות:

$$\sigma_i = \frac{Q}{2\pi bc} \left( 1 - \frac{1}{k_2} \right) \quad \text{ג.} \quad C = \frac{Q}{V} \quad \text{ב.} \quad C = \frac{2\pi\epsilon_0 L}{\ln \frac{b}{a}} \quad \text{א.} \quad (1)$$

$$C_T = \frac{\epsilon_0 a}{d} (x + \epsilon_r (b - x)) \quad \text{א.} \quad (2)$$

$$q_1 = \frac{\epsilon_0 a x V_0}{d}, \quad q_2 = \frac{\epsilon_0 a (b - x) V_0 \epsilon_r}{d} E, \quad \sigma_1 = \frac{\epsilon_0 V_0}{d}, \quad \sigma_2 = \frac{\epsilon_0 V_0 \epsilon_r}{d} \quad \text{ב.}$$

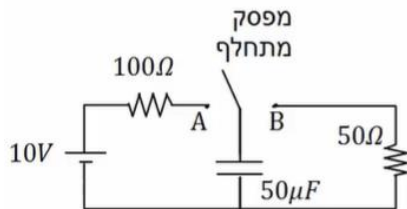
$$\frac{\pi d}{4\epsilon_0 A} \quad (3)$$

$$\sigma_{(x)} = \frac{\epsilon_0 V_0}{d + x \tan \theta} \quad \text{ב.} \quad \frac{\epsilon_0 a}{\theta} \ln \left( 1 + \frac{a}{b} \theta \right) \quad \text{א.} \quad (4)$$

## אנרגיה האגורה בקבל וכוח על חומר דיאלקטרי:

### שאלות:

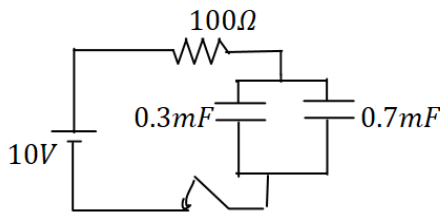
#### (1) מתג מתחלף



במעגל הבא מחברים ב- $t = 0$  את המפסק המתחלף לנקודה A. ב- $t = 0.01$  מעבירים את המפסק לנקודה B.

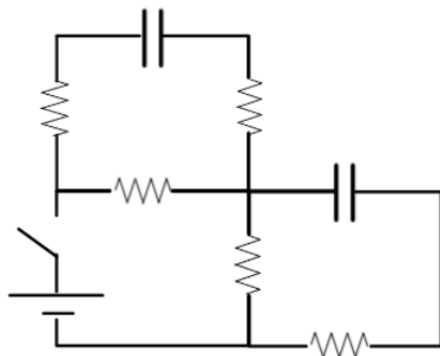
- רשום את המתח על הקבל כתלות בזמן.
- מה המטען על הקבל ב- $t = 0.02$ .
- רשום שוב את הזרם כתלות בזמן.
- צייר גרפים עבור המתח והזרם כתלות בזמן.

#### (2) טעינה של שני קבלים

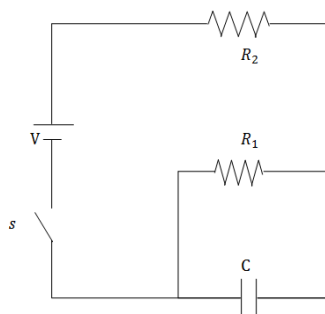


- במעגל הבא סוגרים את המפסק ב- $t = 0$ .
- מהו הזמן האופייני במעגל?
  - מצא את המתח והמטען בכל קבל בזמנים:  $0.2\text{sec}$ ,  $0.8\text{sec}$ .

#### (3) קבלים בהתחלה ובסוף

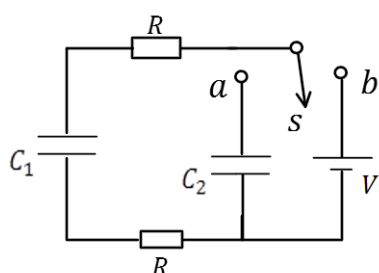


- במעגל הבא הקיבול של הקבלים זהה ושווה ל-C התנגדות הנגדים זהה ושווה ל-R ומתח הסוללה הוא V.
- הקבלים אינם טעונים כאשר המפסק פתוח.
- מצאו את הזרם בסוללה ברגע סגירת המתג.
  - מצאו את הזרם בסוללה והמתח על כל קבל לאחר זמן רב.
  - מהו המטען על כל קבל לאחר זמן רב?



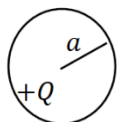
**(4) מטען על קבל במקביל לפי הזמן**

במעגל הבא סוגרים את המפסק ב- $t = 0$  כאשר הקבל אינו טעון. מצא את המטען על הקבל והזרם בכל נגד כפונקציה של הזמן. נתון:  $V, R_1, R_2, C$ .



**(5) פריקה בין שני קבלים**

במעגל הבא הקבל  $C_1$  טעון במטען  $Q_0$  לפני סגירת המתג  $s$  לנקודה  $a$ .  
 א. רשום את המשוואה ממנה ניתן לקבל את המטען על הקבל  $C_1$  כתלות בזמן.  
 ב. פתור את המשוואה ומצא את המטען על כל קבל כתלות בזמן.  
 ג. מהם הזרמים בשני הנגדים כתלות בזמן?



**(6) קבל של שני כדורים**

שני כדורים בעלי רדיוסים  $a$  ו- $b$  מרוחקים מאוד זה מזה. טוענים את הכדורים במטענים  $+Q$  ו- $-Q$  בהתאמה.  
 א. חשב את האנרגיה האלקטרוסטטית הכוללת של המערכת.  
 ב. חשב את הקיבול של המערכת דרך התוצאה שקיבלת עבור האנרגיה.  
 ג. אם מחברים את הכדורים בחוט ארוך מאוד עם התנגדות כוללת  $R$ , מה זמן הפריקה האופייני של המערכת?

## תשובות סופיות:

$$V_C(t) = \begin{cases} 10 \left( 1 - e^{-\frac{t}{0.05}} \right) & 0 < t < 0.01 \\ 8.65 \cdot e^{-\frac{t-0.01}{0.0025}} & 0.1 < t \end{cases} \quad \text{א. (1)}$$

ב.  $q_0(t=0.02) \approx 7.92 \cdot 10^{-6} \text{C}$

ד. ראה סרטון

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

א.  $0.1 \text{sec}$       ב.  $0.8 \text{sec}$        $V_1 = V_2 = 10 \text{V}$ ,  $q_1 = 3 \cdot 10^{-3} \text{C}$ ,  $q_2 = 7 \cdot 10^{-3} \text{C}$       (2)

$V_1 = V_2 \approx 8.65 \text{V}$ ,  $q_1 = 2.6 \cdot 10^{-3} \text{C}$ ,  $q_2 = 6.01 \cdot 10^{-3} \text{C}$        $0.2 \text{sec}$

א.  $\frac{6V}{7R}$       ב. זרם סוללה:  $\frac{V}{2R}$ , מתח קבלים:  $\frac{V}{2}$       (3)

ג. מטען קבלים:  $\frac{CV}{2}$

$$q(t) = \frac{VR_1 \cdot C}{R_2 + R_1} \left( 1 - e^{-\frac{R_2 + R_1}{R_1 C R_2} t} \right) \quad \text{א. (4)}$$

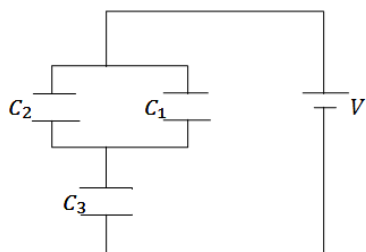
א.  $\frac{C_1 + C_2}{2RC_1 C_2} \cdot q_1 + q_1 - \frac{Q_0}{2RC_2} = 0$       ב.  $q_1(t) = (\tau \cdot A - Q_0) e^{-\frac{t}{\tau}}$       (5)

ג.  $I = \left( \frac{Q_0}{\tau} - A \right) e^{-\frac{t}{\tau}}$        $q_2(t) = (-\tau \cdot A + Q_0) \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right)$

א.  $U = \frac{KQ^2}{2} \left( \frac{b+a}{a \cdot b} \right)$       ב.  $C = \frac{a \cdot b}{K(a+b)}$       ג.  $\tau = RC = \frac{Rab}{K(a+b)}$       (6)

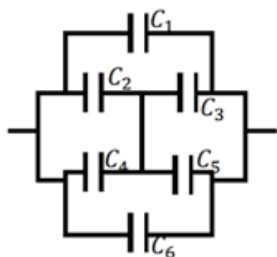
## תרגילים נוספים בקבלים:

### שאלות:



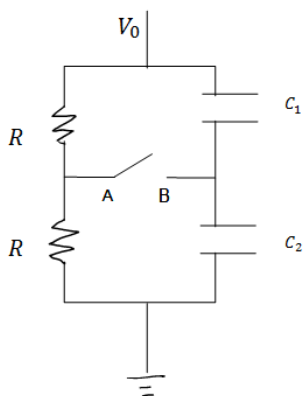
**(1) שלושה קבלים**

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



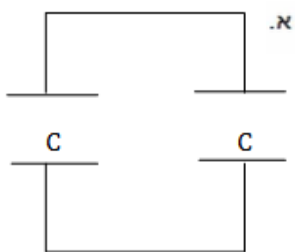
**(2) חיבור קונפיגורציית קבלים**

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



**(3) קבלים עם מפסק**

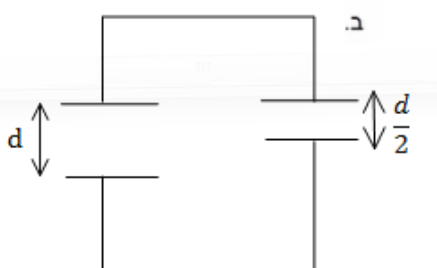
במעגל הבא מחזיקים את הקצה העליון בפוטנציאל קבוע ונתון  $V_0$ . הקצה התחתון מוארק.  
נתון: הקיבול של כל קבל, ההתנגדות הזזה של הנגדים.  
א. מצא את המתח (הפרש הפוטנציאלים) בין הנקודה A לנקודה B.  
ב. סוגרים את המפסק AB, כמה מטען עבר דרך המפסק עד שהמערכת התייצבה?



**(4) שני קבלים טעונים מחוברים אחד לשני**

טעונים בנפרד שני קבלי לוחות זהים ע"י מקור מתח  $V_0$ .  
לאחר הטעינה מנתקים את הקבלים ומחברים אותם אחד לשני, הדק חיובי לחיובי ושלילי לשלילי.

א. מצא את האנרגיה של המערכת אם קיבול הקבלים הוא C.

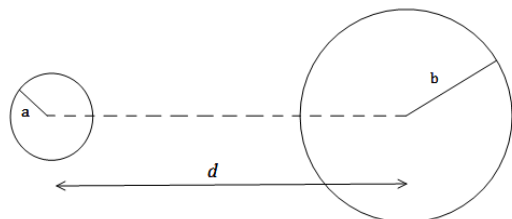


כעת מקטינים את המרחק בין אחד הקבלים פי 2.

ב. מצא את המתח על כל קבל לאחר זמן רב, ואת האנרגיה של המערכת.

ג. חשב את שינוי האנרגיה והסבר לאן עברה?

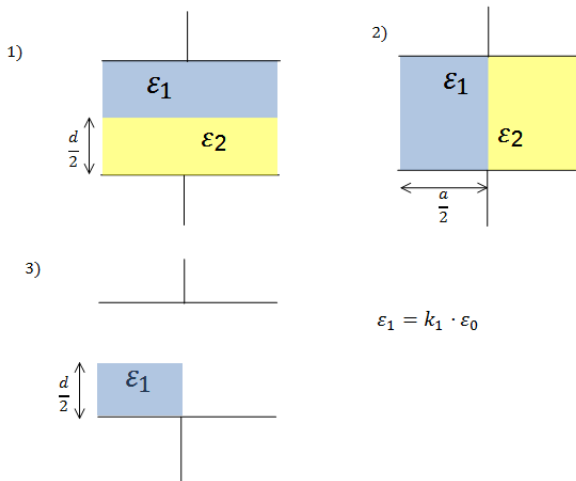
**5 שני כדורים מרוחקים**



שני כדורים מוליכים, בעלי רדיוסים שונים ונתונים  $a, b$  טעונים במטענים שווים ומנוגדים  $+q, -q$ . המרחק בין מרכזי הכדורים הוא  $d$ . נתון כי  $d \gg a, b$

- א. מהו השדה החשמלי לאורך הציר המחבר בין הכדורים (ומחוצה להם)?
- ב. מצא את הפרש הפוטנציאלים בין משטחי הכדורים.
- ג. הראה כי קיבול המערכת הוא:  $C \approx \frac{4\pi\epsilon_0}{\frac{1}{a} + \frac{1}{b} - \frac{1}{d}}$ .

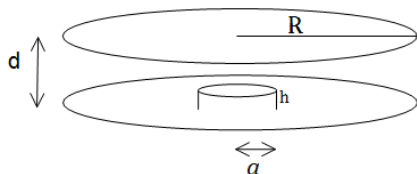
**6 חומרים דיאלקטריים בתוך קבל**



נתון קבל לוחות ריבועיים בעל צלע  $a$  ומרחק בין הלוחות  $d$ . אל הקבל מכניסים חומרים דיאלקטריים שונים עם מקדמים נתונים. החומרים מוכנסים בשלוש צורות שונות כפי שמוצג בציור (במצב השלישי מוכנס רק חומר אחד, החומרים ממלאים את כל הצלע שנכנסת ללוח).

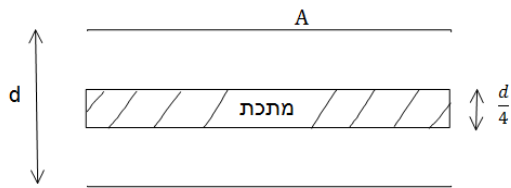
- א. מצא עבור כל מצב את הקיבול של הקבל.
- ב. מחברים את הקבל למקור מתח  $V$  נתון, מהו השדה החשמלי בתוך הקבל בכל אחד מהמצבים?
- ג. מצא את התפלגות המטען החופשית והמושרית בכל אחד מהמצבים.

**7 קבל לוחות עם בליטה**



במערכת הבאה ישנו קבל לוחות עם לוחות מעגליים ברדיוס  $R$ , ומרחק בין הלוחות  $d$  ( $d \ll R$ ). בלוח התחתון ישנה בליטה בצורת גליל ברדיוס  $a$  ועובי  $h$ . מרכז הבליטה במרכז הלוח התחתון.

- א. מצא את הקיבול של הקבל.
- ב. מהו השדה בכל מקום בתוך הקבל אם נתון שהקבל מחובר למקור מתח  $V$ .
- ג. מצא את התפלגות המטען על הלוחות.

**8 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.

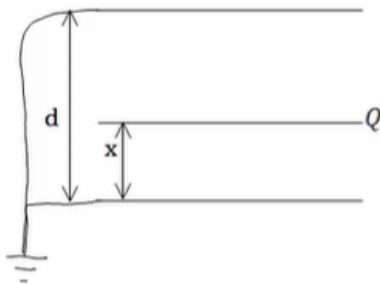
ב. כעת מכניסים לקבל פיסת מתכת בעובי  $\frac{d}{4}$  עם שטח  $A$  ממרכז הקבל.

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').

**9 שלושה לוחות**

נתונה מערכת המורכבת משני לוחות מוארקים

במרחק  $d$ . בין הלוחות, במרחק  $x$  מהלוח התחתון,

מכניסים לוח נוסף זהה עם מטען  $Q$ .

שטח הלוחות הוא  $A \gg d^2$ .

א. מצא את הקיבול של המערכת.

ב. מצא את המטען על כל לוח.

ג. מצא את האנרגיה של המערכת כפונקציה של  $x$ .

ד. מהו הכוח הפועל על הלוח?

**10 שני קבלים טעונים מחוברים לקבל שלישי**

במעגל הבא קיבול הקבלים הוא:  $C_1 = 3\mu F, C_2 = 2\mu F$

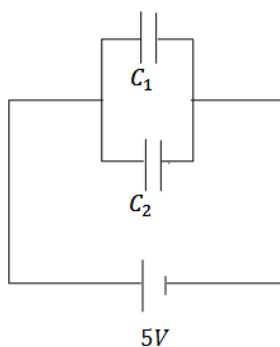
והמתח בסוללה הוא  $5V$ .

לאחר שהקבלים נטענים מנתקים את המקור

ומחליפים אותו בקבל של  $C_3 = 5\mu F$ .

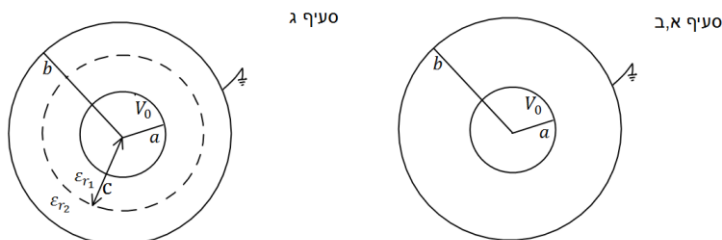
מצא את המטען, המתח והאנרגיה של הקבל החדש

לאחר שהמערכת מתייצבת.



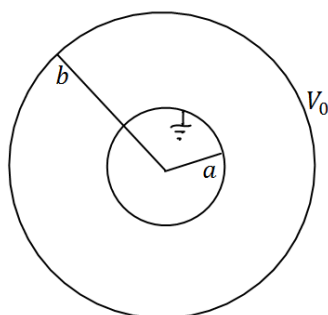
### 11) קבל כדורי עם חומר דיאלקטרי מפוצל

- קבל כדורי מורכב משתי קליפות כדוריות מוליכות דקות ברדיוסים  $a, b$ . הקליפה הפנימית מוחזקת במתח  $V_0$  והקליפה החיצונית מוארקת.
- חשב את המטען על כל קליפה.
  - חשב את הקיבול של הקבל.
- ממלאים את הקבל בשני חומרים דיאלקטריים.
- חומר אחד בעל מקדם  $\epsilon_{r1}$  ממלא את החלל בין הרדיוסים  $a$  ל- $c$  וחומר שני בעל מקדם  $\epsilon_{r2}$  ממלא את החלל בין הרדיוסים  $c$  ל- $b$ .
- חשב את הקיבול החדש.



### 12) קבל לא אידיאלי

- קבל כדורי מורכב משתי קליפות כדוריות מוליכות דקות ברדיוסים  $a, b$ . הקליפה החיצונית מוחזקת במתח  $V_0$  והקליפה הפנימית מוארקת.



- חשב את המטען על כל קליפה, שים לב שיש שדה מחוץ לקבל!
- חשב את הקיבול של הקבל.

מכניסים לקבל חומר דיאלקטרי בעל מקדם  $\epsilon_r$  ממלא את החלל בין הרדיוסים  $a$  ל- $b$ .

- חשב את הקיבול החדש וחשב את המטען החופשי על הקליפה המוארקת.

### 13) 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  $3V$ . לאחר שהקבל נטען במלואו מנתקים את הסוללה ומרחיקים את הלוחות למרחק  $3d$ .

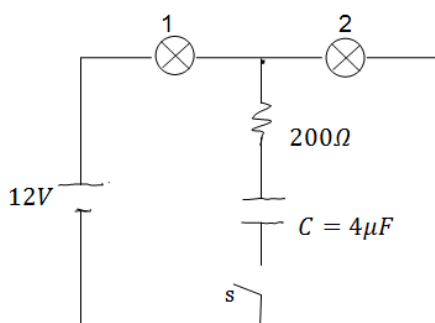
- מצא את הפרש הפוטנציאל החדש על הקבל.
- מצא את האנרגיה ההתחלתית והסופית האגורה בקבל.
- מצא את העבודה הנדרשת ע"מ להרחיק את הלוחות ע"י הגדרת העבודה.

**14 מושכים לוח מקבל גלילי**

קבל גלילי עשוי משני קליפות גליליות באורך  $L$  ורדיוסים  $a < b \ll L$ . נתון כי הגליל הפנימי טעון במטען  $Q$  והחיצוני ב- $-Q$ .

- א. מצא את הקיבול של הקבל.
- ב. מושכים את הגליל הפנימי כלפי מעלה לאורך הציר המשותף כך שהוא בולט בשיעור  $\Delta L \ll L$  בחלקו העליון. מהו הכוח החשמלי הפועל על הגליל הפנימי? (ניתן להניח כי השדה החשמלי מתאפס באזורים בהם אין חפיפה בין הגלילים).

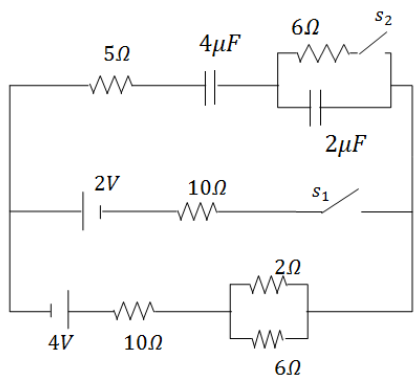
**15 שתי נורות**



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  $200\Omega$ .

- א. חשב את ההתנגדות, המתח וההספק החשמלי של כל נורה כאשר המפסק פתוח.
- ב. חשב את המתח על הקבל אם המפסק סגור והמערכת התייצבה.

**16 מעגל עם קבלים**



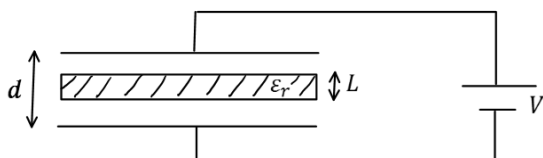
חשב את כל הזרמים במעגל ואת המטען על כל קבל במצב היציב כאשר המפסקים במצב הבא:

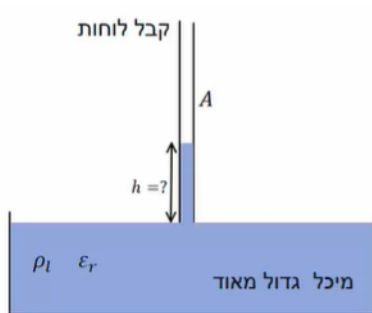
- א.  $s_1$  פתוח ו- $s_2$  סגור.
- ב.  $s_2$  פתוח ו- $s_1$  סגור.
- ג. שני המפסקים סגורים.

**17 קבל לוחות עם חומר דיאלקטרי הממלא רק חלק מהקבל**

קבל לוחות בנוי משני לוחות ריבועיים בעלי צלעות  $a$  המרוחקים מרחק  $d$  זה מזה. בין לוחות הקבל הוכנס חומר דיאלקטרי בעובי  $L < d$  ומקדם דיאלקטרי  $\epsilon_r$ . מחברים את הקבל למקור מתח  $V$ .

- א. מהו השדה החשמלי באזור ללא החומר הדיאלקטרי?
- ב. מהו השדה החשמלי בתוך החומר הדיאלקטרי?
- ג. מהו המטען המושרה על השפה של החומר הדיאלקטרי?





### 18 גובה נוזל בתוך קבל

- קבל לוחות ריבועיים מחובר למקור מתח  $V$ .  
 שטח כל לוח הוא  $A$  והמרחק בין הלוחות הוא  $d$ .  
 מחזיקים את הקבל כך שקצהו טבול במיכל גדול מאוד המכיל נוזל בעל מקדם דיאלקטרי  $\epsilon_r$  וצפיפות מסה ליחידת נפח  $\rho_l$ .  
 המטרה היא למצא עד איזה גובה עולה הנוזל בקבל.
- הנח שהגובה ידוע ומצא את האנרגיה כובדית של המים והאנרגיה הפוטנציאלית של הקבל.
  - מצא מה השינוי באנרגיה של הסוללה ע"י חישוב העבודה שביצעה הסוללה (התייחס לגובה כנתון עדיין).
  - מצא באיזה גובה המערכת תתייצב? השתמש בשיקול שמערכת שואפת להתייצב במינימום של האנרגיה שלה.

## תשובות סופיות:

$$q_1 = 3\mu\text{C}, q_2 = 4.5\mu\text{C}, q_3 = 7.5\mu\text{C} \quad (1)$$

$$C_T = C_1 + C_6 + C_{2345} \quad (2)$$

$$\Delta q = \frac{V_0}{2}(C_2 - C_1) \quad \text{ב.} \quad V_{AB} = \frac{V_0}{2} - \frac{V_0 C_2}{C_1 + C_2} \quad \text{א.} \quad (3)$$

$$U'_T = \frac{2}{3}CV_0^2, V' = \frac{2}{3}V_0 \quad \text{ב.} \quad U_T = 2U_1 = CV_0^2 \quad \text{א.} \quad (4)$$

$$\Delta U = \frac{1}{3}CV_0^2 \quad \text{ג.} \quad \text{האנרגיה ירדה ועברה לכוח שהזיז את הלוחות.}$$

$$\vec{E} = \left( \frac{kq}{x^2} + \frac{kq}{(d-x)^2} \right) \hat{x} \quad \text{א.} \quad \Delta\varphi \approx kq \left( \frac{2}{d} - \frac{1}{b} - \frac{1}{a} \right) \quad \text{ב.} \quad \text{ג. הוכחה} \quad (5)$$

מצב 1:

$$E_1 = E_2 = \frac{V}{d} \quad \text{ב.} \quad C_T = \frac{(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)a^2}{2d} \quad \text{א.}$$

$$\sigma_{free_1} = \frac{\varepsilon_1}{d}V, \sigma_{i_1} = (\varepsilon_0 - \varepsilon_1)\frac{V}{d}, \sigma_{free_2} = \frac{\varepsilon_2}{d}V, \sigma_{i_2} = (\varepsilon_0 - \varepsilon_2)\frac{V}{d} \quad \text{ג.}$$

מצב 2:

$$E_1 = \frac{2\varepsilon_2}{d(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)}V, E_2 = \frac{2\varepsilon_1}{d(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)}V \quad \text{ב.} \quad C_T = \frac{\varepsilon_1\varepsilon_2 a^2 \cdot 2}{d(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)} \quad \text{א.}$$

$$\sigma_{free_1} = \frac{2\varepsilon_1\varepsilon_2}{d(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)}V, \sigma_{i_1} = (\varepsilon_0 - \varepsilon_1)\frac{2\varepsilon_2}{d(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)}V \quad \text{ג. לוח עליון-}$$

$$\sigma_{free_2} = \frac{-2\varepsilon_1\varepsilon_2}{d(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)}V, \sigma_{i_2} = -(\varepsilon_0 - \varepsilon_2)\frac{2\varepsilon_1}{d(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)}V \quad \text{לוח תחתון-}$$

$$\sigma_{free_3} = 0, \sigma_{i_3} = \frac{(\varepsilon_2 - \varepsilon_1)2\varepsilon_0}{d(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)} \quad \text{בין החומרים-}$$

מצב 3:

$$E_1 = \frac{2\varepsilon_0 V}{d(\varepsilon_1 + \varepsilon_0)}, E_2 = \frac{2\varepsilon_1 V}{d(\varepsilon_1 + \varepsilon_0)}, E_3 = \frac{V}{d} \quad \text{ב.} \quad C_T = \frac{\varepsilon_0 a^2}{a} \left( \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_1 + \varepsilon_0} + \frac{1}{2} \right) \quad \text{א.}$$

$$\sigma_T = \sigma_{free} = \varepsilon_0 \frac{V}{d} \quad \text{ג. לוח עליון צד ימין-}$$

$$\sigma_T = \sigma_{free} = \varepsilon_0 \frac{2\varepsilon_0\varepsilon_1 V}{d(\varepsilon_1 + \varepsilon_0)} \quad \text{לוח עליון צד שמאל-}$$

$$\sigma_{T_{down}} = -\varepsilon_0 \frac{V}{d} \quad \text{לוח תחתון צד ימין-}$$

$$\sigma_i = \frac{2\varepsilon_0 V}{d(\varepsilon_1 + \varepsilon_0)} (\varepsilon_1 - \varepsilon_0) \text{ - לוח תחתון צד שמאל-}$$

$$\sigma_T = \frac{2\varepsilon_0 V}{d(\varepsilon_1 + \varepsilon_0)} (\varepsilon_0 - \varepsilon_1), \sigma_{free} = 0 \text{ - באמצע-}$$

$$E_1 = \frac{V}{d-h}, E_2 = \frac{V}{d} \text{ .ג.} \quad C_T = \varepsilon_0 \pi \left( \frac{a^2}{d-h} + \frac{R^2 - a^2}{d} \right) \text{ .א. (7)}$$

$$\sigma_1 = \varepsilon_0 \frac{V}{d-h}, \sigma_2 = \varepsilon_0 \frac{V}{d} \text{ .ג.}$$

$$U = \frac{1}{2} \frac{\varepsilon_0 A}{d} V^2, E = \frac{V}{d}, q = \frac{\varepsilon_0 A}{d} V \text{ .א. (8)}$$

$$U = \frac{2\varepsilon_0 A}{3d} V^2, E_1 = E_2 = \frac{4V}{3d}, q_T = \frac{4\varepsilon_0 A V}{3d} \text{ .ג.}$$

$$U = \frac{3\varepsilon_0 A V^2}{8d}, E_1 = E_2 = \frac{V}{d}, q_T = \frac{\varepsilon_0 A}{d} V \text{ .ג.}$$

$$q_1 = Q \frac{d-x}{d}, q_2 = Q \left( \frac{x}{d} \right) \text{ .ג.} \quad C_T = \varepsilon_0 A \left( \frac{d}{x(d-x)} \right) \text{ .א. (9)}$$

$$\vec{F} = \frac{Q^2}{2\varepsilon_0 A d} (d-2x) \text{ .ד.} \quad U(x) = \frac{Q^2 \cdot x(d-x)}{2\varepsilon_0 A d} \text{ .ג.}$$

$$q'_3 = 12.5 \mu\text{C}, V'_3 = 2.5\text{V}, U = 15.625\text{J} \text{ (10)}$$

$$C = \frac{1}{k \left( \frac{1}{a} - \frac{1}{b} \right)} \text{ .ג.} \quad q_1 = \frac{V_0}{k \left( \frac{1}{a} - \frac{1}{b} \right)}, q_2 = -q_1 \text{ .א. (11)}$$

$$C = \frac{q}{\left| kq \left( \frac{1}{\varepsilon_{r_1}} \left( \frac{1}{c} - \frac{1}{a} \right) + \frac{1}{\varepsilon_{r_2}} \left( \frac{1}{b} - \frac{1}{c} \right) \right) \right|} \text{ .ג.}$$

$$C_T = \frac{1}{k \left( \frac{1}{a} - \frac{1}{b} \right)} + \frac{b}{k} \text{ .ג.} \quad q_1 = \frac{V_0}{k \left( \frac{1}{b} - \frac{1}{a} \right)}, q_2 = \frac{bV_0}{ak \left( \frac{1}{b} - \frac{1}{a} \right)} \text{ .א. (12)}$$

$$q_1 = \frac{-\varepsilon_r}{k \left( \frac{1}{a} - \frac{1}{b} \right)} V_0, C_T = \frac{\varepsilon_r}{k \left( \frac{1}{a} - \frac{1}{b} \right)} + \frac{b}{k} \text{ .ג.}$$

$$U_{C_1} = 15.93 \cdot 10^{-12} \text{J}, U_{C_p} = 47.79 \cdot 10^{-12} \text{J} \text{ .ג.} \quad V' = 9\text{V} \text{ .א. (13)}$$

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

$$|F| = \frac{q^2 \ln \frac{b}{a}}{4\pi\epsilon_0 (L-x)^2} \quad \text{ב.} \quad C = \frac{2\pi\epsilon_0 L}{\ln \frac{b}{a}} \quad \text{א. (14)}$$

$$R_1 = 200\Omega, V_1 = 5.34V, P_1 = 0.143W \quad \text{נורה 1 : (15)}$$

$$R_2 = 250\Omega, V_2 = 6.68V, P_2 = 0.178W \quad \text{נורה 2 :}$$

$$V_0 = V_2 = 6.68V \quad \text{ב.}$$

$$I = \frac{12}{43} A, q_1 = \frac{136}{43} \mu C \quad \text{ג.} \quad I = \frac{12}{43} A, q_1 = \frac{136}{129} \mu C \quad \text{ב.} \quad \text{א. } q_1 = 16\mu C, \text{זרם} = 0. \quad \text{(16)}$$

$$E = \frac{V}{d \cdot \epsilon_r - L(\epsilon_r - 1)} \quad \text{ב.} \quad E_0 = \frac{q}{\epsilon_0 a^2} = \frac{V}{d - L \left( 1 - \frac{1}{\epsilon_r} \right)} \quad \text{א. (17)}$$

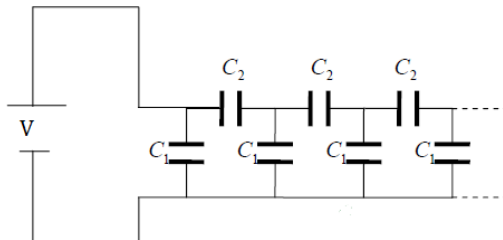
$$\sigma_T = \epsilon_0 \left( \frac{V}{\epsilon_r d - L(\epsilon_r - 1)} - \frac{V}{d - L \left( 1 - \frac{1}{\epsilon_r} \right)} \right) \quad \text{ג.}$$

$$\Delta U = -\Delta C_{(h)} V^2 \quad \text{ב.} \quad U_g = \rho_l a d g \frac{1}{2} h^2, U_C = \frac{1}{2} C_{(h)} U^2 \quad \text{א. (18)}$$

$$h = \frac{\epsilon_0 (\epsilon_r - 1) V^2}{2d^2 \rho_l g} \quad \text{ג.}$$

## טור אינסופי של קבלים:

### שאלות:

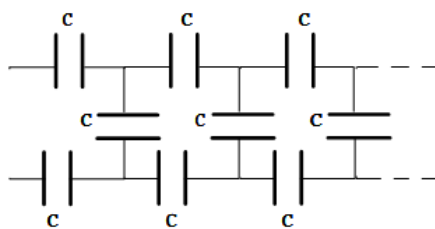


#### (1) תרגיל 1 והסבר

חשב את הקיבול של הטור האינסופי הבא.  
 הקיבול של הקבלים נתון.

#### (2) טור אינסופי של קבלים זהים

במערכת הבאה הקיבול של כל הקבלים זהה ונתון.



א. מצא את קיבול כל הטור.

ב. מצא את המטען על כל קבל במערכת  
 אם נתון שהמערכת מחוברת למקור  
 מתח  $V_1$ .

הדרכה לסעיף ב' :

סמן את המטען על כל אחד מהקבלים העליונים כ- $Q_n$ .  
 הראה ש- $Q_n$  מקיים סדרה הנדסית ומצא את המכפיל.  
 לאחר מכן השתמש במתח הנתון למציאת  $Q_1$ .

### תשובות סופיות:

$$C_T = \frac{C_1 + \sqrt{C_1^2 + 4C_1C_2}}{2} \quad (1)$$

$$Q_n = \frac{C}{2}(\sqrt{3}-1)V_1(2-\sqrt{3})^n, \quad Q'_n = CV_1(2-\sqrt{3})^{n+1} \quad \text{ב.}$$

$$C_T = \frac{C}{2}(\sqrt{3}-1) \quad \text{א.} \quad (2)$$

# פיזיקה קלאסית 2 (לפיזיקאים)

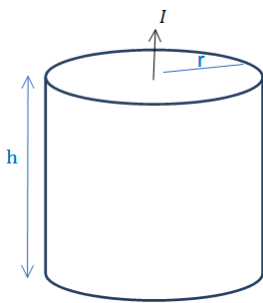
פרק 12 - נגדים זרם וצפיפות זרם

תוכן העניינים

1. הרצאות ותרגילים ..... 67

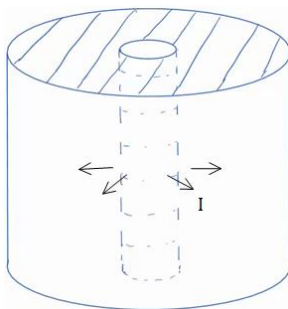
## הרצאות ותרגילים:

### שאלות:

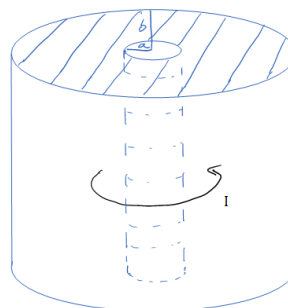


(1) נוסחה לחישוב התנגדות ודוגמה עבור נגד גלילי  
 גליל מלא בעל רדיוס  $r$  וגובה  $h$  עשוי מחומר בעל התנגדות  
 סגולית משתנה  $\rho = \rho_0 \frac{z}{h}$  כאשר  $\rho_0$  נתון ו- $z$  הוא המרחק  
 מבסיס הגליל.

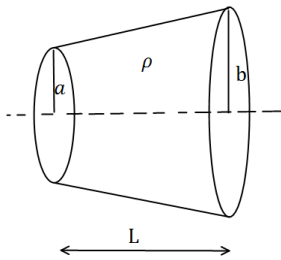
- חשב את ההתנגדות השקולה.  
 נתון שהזרם עובר בין הבסיסים (לאורך  $z$ )  
 מחברים את הגליל למקור מתח נתון  $V_0$   
 (המתח הוא בין בסיס אחד לבסיס שני).
- מצא את הזרם הכולל בגליל.
- מצא את צפיפות הזרם והשדה החשמלי בגליל (פתרון בסרטון הבא).



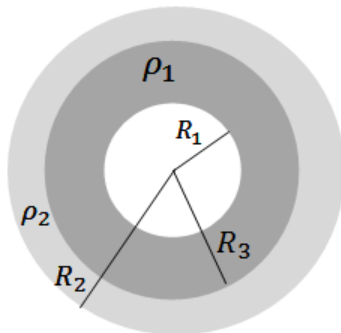
(2) זרם רדיאלי (2)  
 קליפה גלילית עבה עם רדיוס פנימי  $a$  ורדיוס חיצוני  $b$   
 מלאה בחומר בעל התנגדות סגולית  $\rho$  אחידה ונתונה.  
 א. מצא את ההתנגדות השקולה של הקליפה אם  
 הזרם זורם בכיוון הרדיאלי.  
 ב. מחברים מקור מתח  $V_0$  בין המעטפת הפנימית  
 למעטפת החיצונית של הקליפה.  
 מצא את צפיפות הזרם בקליפה.  
 ג. מצא את השדה החשמלי בתוך הקליפה.



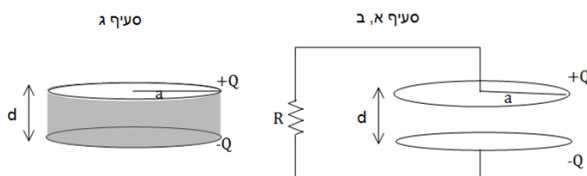
(3) זרם מעגלי בגליל (3)  
 קליפה גלילית עבה עם רדיוס פנימי  $a$  ורדיוס חיצוני  $b$   
 מלאה בחומר בעל התנגדות סגולית  $\rho$  אחידה ונתונה.  
 א. מצא את ההתנגדות השקולה של הקליפה אם  
 הזרם זורם בכיוון טטה (ז"א זרם מעגלי).  
 ב. נתון הזרם הכולל הזורם בנגד.  
 מצא את הצפיפות כתלות במרחק ממרכז הנגד.  
 ג. מצא את השדה החשמלי בתוך הקליפה.

**(4) חרוט קטום**

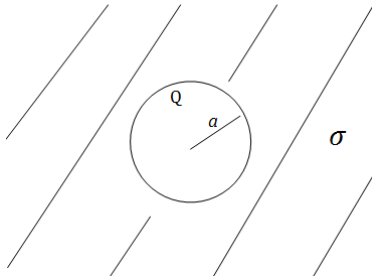
- נתון חרוט קטום שאורכו  $L$ , רדיוס בסיסו הקטן  $a$  ורדיוס בסיסו הגדול  $b$ .  
 בין שני הבסיסים נתון הפרש פוטנציאלים.  
 ההתנגדות הסגולית של החרוט היא  $\rho$ .  
 חשבו את ההתנגדות השקולה של החרוט.

**(5) נגד כדורי מחולק לשני חומרים שונים**

- נגד בצורת קליפה כדורית בעלת רדיוס פנימי  $R_1$  ורדיוס חיצוני  $R_2$  מורכב מחומר בעל התנגדות סגולית  $\rho_1$  בתחום  $R_1 < r < R_2$  והתנגדות סגולית  $\rho_2$  בתחום  $R_2 < r < R_3$ .  
 א. מצא את ההתנגדות השקולה של הקליפה (זרם בכיוון רדיאלי).  
 ב. מצא את צפיפות הזרם בנגד אם נתון שמחברים את הנגד למקור מתח קבוע  $V$ .  
 ג. מהו השדה החשמלי בנגד?  
 ד. מצא את התפלגות המטען (משטחית ונפחית) בקליפה.

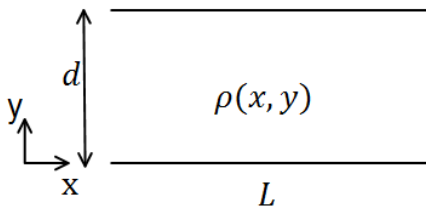
**(6) צפיפות זרם בתוך לוח של קבל לוחות**

- קבל לוחות עגולים טעון במטען  $Q$  ומחובר לנגד. רדיוס הלוחות הוא  $a$  והמרחק בין הלוחות הוא  $d \ll a$ , התנגדות הנגד היא  $R$ .  
 א. מצא את הזרם במעגל.  
 ב. מצא את צפיפות הזרם על פני לוח הקבל. הדרכה: הנח כי צפיפות המטען על הקבל תמיד אחידה. חשב את הזרם שיוצא מחלק הלוח בין  $r$  כלשהו ל- $a$ . חשוב איזו סוג של צפיפות ישנה על הלוח. מצא את הצפיפות ע"י חלוקה של הזרם בחתך.  
 ג. בסעיף זה הנגד לא קיים, במקומו ממלאים את הקבל בחומר בעל התנגדות סגולית  $\rho$  אחידה. חזור על סעיפים א' ו-ב'.

**(7) קליפה טעונה מוליכה בתוך נגד**

קליפה מוליכה (מוליכות אידיאלית) ברדיוס  $a$   
 נמצאת בתוך חומר אינסופי עם מוליכות סגולית  $\sigma$ .  
 נתון כי המטען על הקליפה ב-  $t=0$  הוא  $Q$ .  
 א. מצא את המטען על הקליפה כפונקציה של הזמן.

ב. מצא את צפיפות הזרם ואת השדה החשמלי בנגד.

**(8) התנגדות תלויה באורך וברוחב**

נתונים שני לוחות מקבילים בעלי ממדים  $L \times L$ , המרוחקים זה מזה מרחק  $d$ , אשר ביניהם הפרש פוטנציאלים  $(L \gg d)$ .

בין שני הלוחות ישנו חומר מוליך בעל התנגדות סגולית  $\rho(x, y)$ .

חשבו את ההתנגדות בשני המקרים הבאים:

א. 
$$\rho = \rho_0 \sin\left(\frac{\pi y}{d}\right)$$

ב. 
$$\rho = \rho_0 \frac{\sin\left(\frac{\pi y}{d}\right)}{\sin\left(\frac{\pi x}{L}\right)}$$

## תשובות סופיות:

$$E = \rho_0 \frac{z}{h} \frac{I}{\pi r^2} \hat{z}, \vec{J} = \frac{I}{\pi r^2} \hat{z} \quad \text{ג.} \quad I = \frac{V_0}{R_T} \quad \text{ב.} \quad R_T = \frac{\rho_0 h}{2\pi r^2} \quad \text{א.} \quad (1)$$

$$E = \frac{\rho V_0}{R_T 2\pi r h} \hat{r} \quad \text{ג.} \quad \vec{J} = \frac{V_0}{R_T 2\pi r h} \hat{r} \quad \text{ב.} \quad R_T = \frac{\rho}{2\pi h} \ln \frac{b}{a} \quad \text{א.} \quad (2)$$

$$\vec{E} = \rho \cdot \vec{J} \quad \text{ג.} \quad \vec{J} = \frac{V_T}{\rho 2\pi r} \hat{\theta} \quad \text{ב.} \quad R_T = \frac{1}{\frac{h}{2\pi\rho} \ln \frac{b}{a}} \quad \text{א.} \quad (3)$$

$$R = \frac{\rho L}{\pi ab} \quad (4)$$

$$\vec{J}_{(r)} = \frac{I}{4\pi r^2} \hat{r} \quad \text{ב.} \quad R_T = \frac{\rho_1}{4\pi} \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_3} \right) + \frac{\rho_2}{4\pi} \left( \frac{1}{R_3} - \frac{1}{R_2} \right) \quad \text{א.} \quad (5)$$

$$\vec{E} = \begin{cases} \rho_1 \frac{I}{4\pi r^2} \hat{r} & R_1 < r < R_3 \\ \rho_2 \frac{I}{4\pi r^2} \hat{r} & R_3 < r < R_2 \end{cases} \quad \text{ג.}$$

$$\tilde{\rho} = 0, \tilde{\sigma}_{(R_1)} = \epsilon_0 \rho_1 \frac{I}{4\pi R_1^2} - 0, \tilde{\sigma}_{(R_3)} = \frac{I \epsilon_0}{4\pi R_3^2} (\rho_2 - \rho_1), \tilde{\sigma}_{(R_2)} = -\epsilon_0 \frac{I}{4\pi R_2^2} \rho_2 \quad \text{ד.}$$

$$k = \frac{a^2 - r^2}{2\pi r a^2} \frac{Q}{RC} e^{-\frac{t}{RC}} \quad \text{ב.} \quad I = \frac{Q}{RC} \cdot e^{-\frac{t}{RC}} \quad \text{א.} \quad (6)$$

$$\vec{J} = \frac{I}{\pi a^2} \hat{z}, k = 0!, I = \frac{Q}{RC} \cdot e^{-\frac{t}{RC}} \quad \text{ג.}$$

$$\vec{J} = \frac{\sigma q(t)}{\epsilon_0 4\pi r^2} \hat{r}, \vec{E} = \frac{kq(t)}{r^2} \hat{r} \quad \text{ב.} \quad q(t) = Q e^{-\frac{\sigma t}{\epsilon_0}} \quad \text{א.} \quad (7)$$

$$R_T = \frac{\rho_0 d}{L^2} \quad \text{ב.} \quad R = \frac{2\rho_0 d}{\pi L^2} \quad \text{א.} \quad (8)$$

# פיזיקה קלאסית 2 (לפיזיקאים)

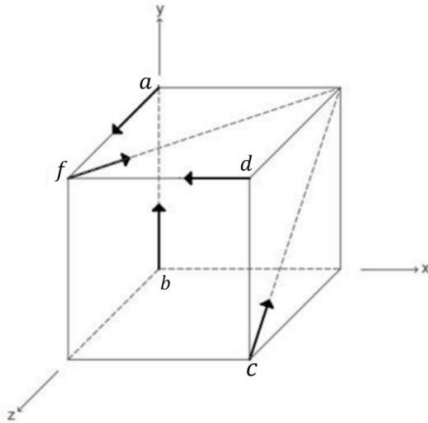
פרק 13 - חוק לורנץ וכוח על תייל נושא זרם

תוכן העניינים

71	.....	1. חוק לורנץ
76	.....	2. כוח על תיל נושא זרם
79	.....	3. תרגילים נוספים

## חוק לורנץ:

### שאלות:



- (1) מצא את הכוח על כל חלקיק החיצים בציוור מציינים מהירויות של חלקיקים חיוביים שונים. החלקיקים נמצאים בשדה מגנטי אחיד שכיוונו הוא  $\hat{x}$ . עבור כל חלקיק מצא: מהו כיוון הכוח ברגע הנתון באיור? מהי צורת המסלול?

- (2) חלקיק זז בשדה מגנטי חלקיק הטעון במטען  $q$  נע במהירות  $\vec{v}$  באזור בו שורר שדה מגנטי  $\vec{B} = -2\hat{x} + 3\hat{y}$  טסלה.

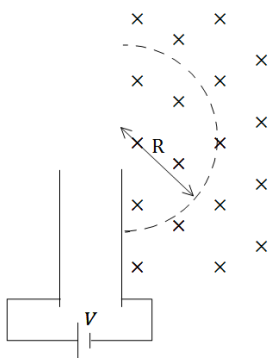
חשב את הכוח המגנטי שיפעל על החלקיק אם נתון:

א.  $\vec{v} = 2\hat{x} + 3\hat{y}$  מטר לשניה ו- $q = 2C$

ב.  $\vec{v} = -\hat{x} + 2\hat{z}$  מטר לשניה ו- $q = -1\mu C$

- (3) ספקטוגרף המסות של דמפסטר

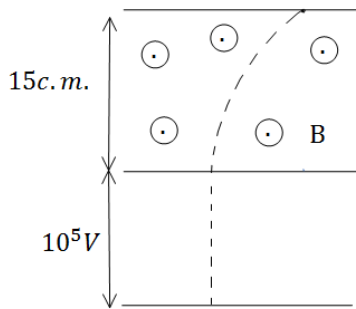
המערכת הבאה מתארת את ספקטוגרף המסות של דמפסטר. מטרתה היא להפריד בין חלקיקים בעלי מסות שונות. חלקיקים עם מטען חיובי משוחררים ממנוחה ליד לוח הקבל החיובי. החלקיקים מואצים ע"י מקור מתח  $V$  המחבר בין הלוחות. החלקיקים עוברים דרך הלוח השלילי ונכנסים לשדה מגנטי אחיד הפועל לתוך הדף. מצא את רדיוס הסיבוב כתלות במסת החלקיק. נתונים:  $B, q, V$ .



- (4) פרוטון בזווית

פרוטון נכנס בזווית של 30 מעלות לשדה מגנטי אחיד בעוצמה של  $0.15T$ . מצא את רדיוס הסיבוב של הפרוטון אם ידוע שגודל מהירותו  $V = 10^6 \frac{m}{sec}$ .

**(5) פרוטון פוגע במסך**



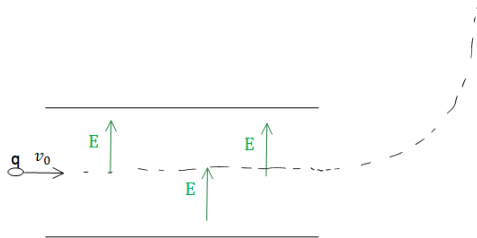
פרוטון מואץ בקבל הנמצא במתח של  $10^5 V$ .  
לאחר מכן הפרוטון עובר בשדה מגנטי אחיד עד  
לפגיעתו במסך הנמצא במרחק  $15c.m.$  מהקבל.  
עוצמת השדה המגנטי היא  $0.2T$ .

א. מצא את המרחק האופקי שעבר הפרוטון  
עד לפגיעתו במסך.

ב. מצא את הזמן עד לפגיעה במסך.

ג. מהו המתח המינימלי הדרוש על מנת שהפרוטון  
יפגע במסך?

**(6) מטען עובר קבל**

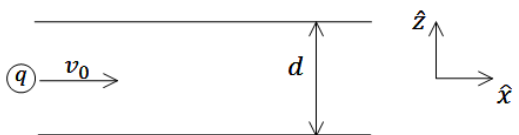


מטען נע בתוך קבל לוחות עם מהירות  
קבועה  $V_0$  בקו ישר ובמקביל ללוחות הקבל.  
בתוך הקבל (ורק בתוכו) ישנו שדה חשמלי  
אחיד ונתון  $E$ . כאשר המטען יוצא מהקבל  
הוא מבצע תנועה מעגלית כלפי מעלה.  
ידוע כי בכל המרחב (בתוך ומחוץ לקבל) יש  
שדה מגנטי אחיד אך לא ידוע מה גודלו וכיוונו.  
הזנח את כוח הכובד הפועל על המטען.

א. מה הסימן של המטען?

ב. מצא את כיוון וגודל השדה המגנטי.

**(7) מטען פוגע בלוחות קבל**



חלקיק בעל מסה  $m$  ומטען  $q > 0$  נכנס  
במרכז של קבל לוחות עם מהירות  $\vec{v} = v_0 \hat{x}$ .  
לוחות הקבל מקבילים למישור  $xy$  והמרחק  
ביניהם הוא  $d$ .

הקבל מחובר למקור מתח  $V$ , כאשר הלוח העליון נמצא בפוטנציאל הגבוה.

א. מצא את המרחק מקצה הלוח של הקבל בו יפגע המטען.

ב. כעת הנח שהקבל אינו מחובר למקור ואינו טעון אך במרחב קיים שדה

מגנטי אחיד  $\vec{B} = B_0 \hat{y}$ .

מצא את המרחק מקצה הלוח בו יפגע המטען.

ג. לאיזה כיוון יסטה המטען אם הקבל מחובר למקור מתח ובמרחב קיים  
שדה מגנטי.

**8) מטען בשדה מגנטי וחשמלי**

שדה חשמלי קיים בתחום  $x < 0$  כך שמעל ציר ה- $x$  ( $y > 0$ )

השדה הוא:  $\vec{E} = -E_0 \hat{y}$  ומתחת לציר ה- $x$  ( $y < 0$ )

השדה הוא:  $\vec{E} = E_0 \hat{y}$ , ראה שרטוט.

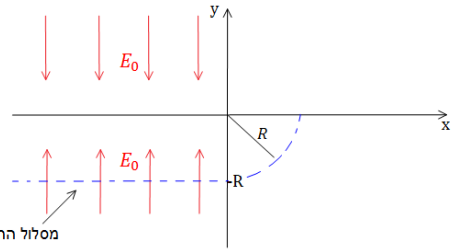
בכל המרחב קיים גם שדה מגנטי אחיד,

שכיוונו וגודלו אינם ידועים.

חלקיק בעל מסה  $m$  ומטען  $|q|$  מגיע

מ- $x = -\infty$  ונע בקו ישר ובמהירות קבועה.

גובה המסלול של החלקיק הוא  $y = -R$ .



כאשר החלקיק חוצה את ציר ה- $y$  הוא מבצע רבע מעגל ברדיוס  $R$  (ראה ציור).

נתון:  $E_0, |q|, m, R$ .

א. שרטט את המשך מסלול המטען.

ב. מה סימן המטען?

ג. מצא את המהירות של המטען, והשדה המגנטי.

ד. מצא את המסה הדרושה על מנת לבצע אותו מסלול בשדה מגנטי הגדול

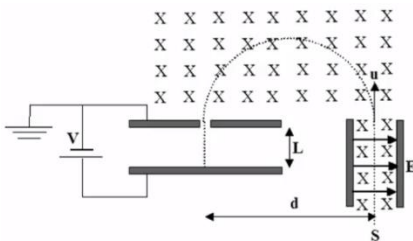
פי 3 מהשדה הקיים, כאשר שאר התנאים אינם משתנים.

**9) 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  $\vec{E}$

וכיוונו ימינה ושדה מגנטי אחיד  $\vec{B}$  והמכוון

אל תוך הדף, כמוראה 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 החלקיקים.

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

א. באיזו מהירות  $v$  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

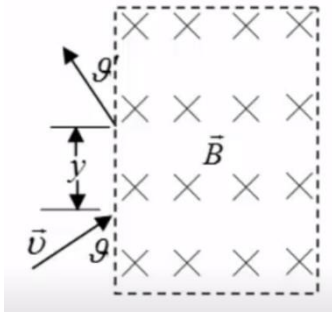
כדי שהחלקיקים הנכנסים לתוכו יעצרו לחלוטין?

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?

**10 מטען נכנס ויוצא משדה מגנטי בזווית**



אלומות חלקיקים בעלי מסה  $m$  ומטען  $q$  נקלעות לאזור בו שורר שדה מגנטי אחיד  $\vec{B}$  המאונך למישור הדרך במגמה פנימה. לחלקיקים אנרגיה קינטית  $E_k$  והם נכנסים לאזור המגנטי בזווית  $\theta$ , כמתואר בציור.

א. חשבו את המרחק האנכי  $y$  אותו יעברו החלקיקים מנקודת כניסתם לאזור המגנטי ועד ליציאתם ממנו.

ב. חשבו את זווית היציאה  $\theta'$  (ראו איור).

**11 עוד מטען נכנס ויוצא משדה מגנטי בזווית**

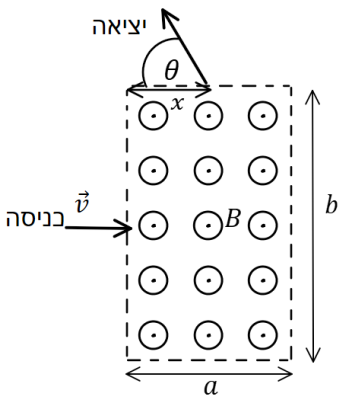
שדה מגנטי אחיד  $B$  נמצא בתחום מלבני בגודל  $a \times b$ . מחוץ לתחום השדה הוא אפס. כיוון השדה החוצה מהדף. מטען  $|q|$  נכנס לתחום המלבני בדיוק במרכז המלבן, במהירות שגודלה  $v$  וכיוונה מאונך לשפת המלבן (ראה איור).

ידוע שהמטען יוצא מהצלע העליונה של המלבן.

א. מהו סימן המטען? ומהו גודל מהירותו ביציאה?

ב. מהו המרחק  $x$  מקצה המלבן בו יוצא המטען?

ג. מהי הזווית  $\theta$  של וקטור המהירות ביציאה ביחס לצלע המלבן?



**תשובות סופיות:**

$$\vec{F}_a = qvB\hat{y}, \vec{F}_b = qvB(-\hat{z}), \vec{F}_c = \frac{qvB}{\sqrt{2}}(-\hat{y}-\hat{z}), \vec{F}_d = 0, \vec{F}_f = \frac{qvB}{\sqrt{2}}(-\hat{y}) \quad (1)$$

$\vec{F}_a$  : מעגל אנכי במישור yz,  $\vec{F}_b$  : מעגל אנכי במישור yz,  $\vec{F}_c$  : מעגל אנכי במישור yz שמתקדמת סביב ציר x.

$$\vec{F} = 24N\hat{z} \quad \text{א.} \quad \vec{F} = (6\hat{x} + 4\hat{y} + 3\hat{z})\mu N \quad \text{ב.} \quad (2)$$

$$R = \sqrt{\frac{2V}{qB^2}} \cdot \sqrt{m} \quad (3)$$

$$R \approx 3.48 \cdot 10^{-2} m \quad (4)$$

$$V = 4.312 \cdot 10^4 V \quad \text{ג.} \quad t = 3.371 \text{ sec} \quad \text{ב.} \quad \Delta x = 0.0315 \quad \text{א.} \quad (5)$$

$$B \odot, B = \frac{E}{V} \quad \text{ב.} \quad \text{א. שלילי} \quad (6)$$

$$x^2 = R^2 - \left(R - \frac{d}{2}\right)^2 \quad \text{ב.} \quad x = V_0 \sqrt{\frac{md^2}{qV}} \quad \text{א.} \quad (7)$$

$$\varepsilon F_z = q \left( V_0 B_0 - \frac{V}{d} \right) > 0 \quad \text{ג. המטען יסטה למעלה אם:}$$

$$\varepsilon F_z = q \left( V_0 B_0 - \frac{V}{d} \right) < 0 \quad \text{המטען יסטה למטה אם:}$$

$$V = \sqrt{\frac{qRE_0}{m}}, \vec{B} = \sqrt{\frac{mE_0}{qR}}\hat{z} \quad \text{ג.} \quad \text{א. ראה סרטון} \quad \text{ב.} \quad \text{sign}(q) = -1 \quad (8)$$

$$m_2 = qm_1 \quad \text{ד.}$$

$$\frac{2BL}{E} \quad \text{ה.} \quad \frac{mE^2}{2qB^2} \quad \text{ז.} \quad \frac{\pi m}{qB} \quad \text{ג.} \quad \frac{2mE}{qB^2} \quad \text{ב.} \quad \frac{E}{B} \quad \text{א.} \quad (9)$$

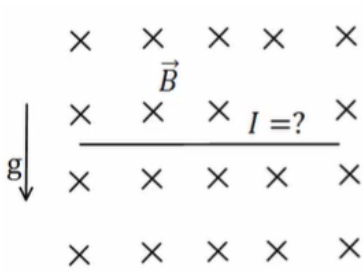
$$y = \frac{\sqrt{8mE_k} \sin \vartheta}{Bq} \quad \text{א.} \quad \text{ב.} \quad \vartheta' = \vartheta \quad (10)$$

**(11)** א. אם כיוון הכוח הפוך לכיוון המכפלה  $\vec{V} \times \vec{B}$  אז המטען שלילי.  
 $\vec{F}$  תמיד מאונך ל- $\vec{V}$  ול- $\vec{B}$  לכן ה- $\vec{F}_b$  אף פעם לא ישנה את גודל המהירות, רק את הכיוון (V כניסה = V יציאה).

$$\cos \theta = \frac{b}{2R} - 1 \quad \text{ג.} \quad x = \sqrt{b \left( \frac{b}{4} - \frac{mV}{qB} \right)} \quad \text{ב.}$$

## כוח על תיל נושא זרם:

### שאלות:



**(1) דוגמה-תיל מרחף**

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

היא:  $\lambda = 20 \frac{\text{gr}}{\text{c.m}}$

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

**(2) דוגמה-מסגרת מלבנית בשדה לא אחיד**

מסגרת מלבנית בעלת 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  $B_2 = 3\text{T}$ .

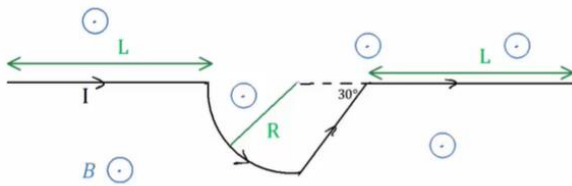
במסגרת זורם זרם  $I = 2\text{A}$  עם כיוון השעון. נתון:  $a = 0.5\text{m}$ . מצא את הכוח השקול הפועל על המסגרת?

**(3) כוח על תיל מכופף**

תיל הנושא זרם  $I$  מכופף כפי שנראה באיור. החלק העגול הוא רבע מעגל בעל רדיוס  $R$ .

בכל המרחב יש שדה מגנטי אחיד  $B$  החוצה מהדף.

מצא את הכוח השקול על התיל אם  $L$ ,  $I$ ,  $B$ ,  $R$  נתונים.



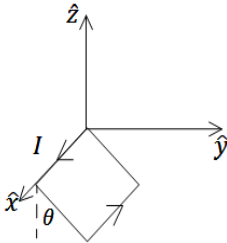
**(4) כוח על תיל מכופף עם חלוקה לחתיכות**

הנח נתונים זהים לשאלה קודמת.

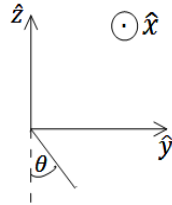
מצא את הכוח השקול על התיל ע"י חלוקה לחתיכות, חישוב הכוח ע"י כל חתיכה בנפרד וסכימה.

**(5) לולאה תלויה**

לולאה ריבועית בעלת צלע  $a$  ומסה  $m$  תלויה על ציר ה- $x$  (הצלע שנמצאת על הציר מקובעת לציר) ויכולה להסתובב סביבו. בלולאה זרם  $I$  כך שהזרם בצלע שנמצאת על ציר ה- $x$  חיובי (זרם בכיוון ציר ה- $x$ ).



מבט תלת מימדי



מבט דו-מימדי

- א. מצא את גודל השדה המגנטי שדרוש להפעיל בכיוון ציר ה- $z$  על מנת שהלולאה תתייצב במנוחה בזווית  $\theta$  ביחס לציר ה- $z$ .
- ב. מצא את גודל השדה המגנטי שדרוש להפעיל בכיוון ציר ה- $y$  על מנת שהלולאה תתייצב במנוחה בזווית  $\theta$  ביחס לציר ה- $z$ .

**(6) כוח על לולאה סגורה**

הראו כי:

- א. הכוח המגנטי על לולאת זרם ריבועית בשדה אחיד הניצב למישור הלולאה מתאפס.
- ב. הכוח המגנטי על לולאת זרם ריבועית בשדה אחיד המקביל למישור הלולאה מתאפס.
- ג. הכוח המגנטי על לולאת זרם ריבועית בשדה אחיד מתאפס.
- ד. הכוח המגנטי על לולאת זרם סגורה בעלת כל צורה שהיא בשדה אחיד מתאפס.

### תשובות סופיות:

$$(1) \quad I = 2 \cdot 10^3 \text{ A, ימינה.}$$

$$(2) \quad F = 1 \text{ N, ימינה.}$$

$$(3) \quad F = BI(2L + (1 + \sqrt{3})R)$$

$$(4) \quad F_x = 0, F_y = IB(2L + (1 + \sqrt{3})R)(-1) \hat{y}$$

$$(5) \quad \text{א. } B = \frac{mg}{2aI} \tan \theta \hat{z} \quad \text{ב. } \vec{B} = -\frac{mg}{2aI} \hat{y}$$

$$(6) \quad \text{שאלת הוכחה.}$$

## תרגילים נוספים:

### שאלות:

#### (1) מטען בשדה מגנטי עם משוואות דיפרנציאליות

נתון שדה חשמלי  $\vec{E} = \alpha x \hat{x}$  ושדה מגנטי קבוע ואחיד  $\vec{B} = B_0 \hat{z}$ .  
 חלקיק בעל מסה  $m$  ומטען  $q$  נמצא בראשית בזמן  $t = 0$ .  
 מהירותו ההתחלתית היא:  $\vec{v} = v_0 \hat{x}$ .

א. מהו מיקום החלקיק כתלות בזמן בכל אחד מהמקרים הבאים:

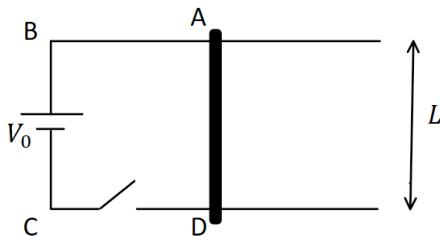
$$\alpha > \frac{q}{m} B_0^2, \quad \alpha < \frac{q}{m} B_0^2, \quad \alpha = \frac{q}{m} B_0^2$$

#### (2) מטען בשדה חשמלי רדיאלי

נתון שדה חשמלי  $\vec{E} = \alpha(x\hat{x} + y\hat{y})$  ושדה מגנטי קבוע ואחיד  $\vec{B} = B_0 \hat{z}$ .  
 חלקיק בעל מסה  $m$  ומטען  $q$  נמצא בראשית בזמן  $t = 0$ .  
 מהירותו ההתחלתית היא:  $\vec{v} = v_0 \hat{x}$ .

כתוב 4 משוואות דיפרנציאליות מסדר ראשון עבור המיקום והמהירות.  
 הסבר את דרך הפתרון, אין צורך לפתור.

#### (3) מוט נע על מסילה עם חיכוך וסוללה



מקור מתח  $V_0$  מחובר לשני תילים מוליכים ומקבילים במרחק  $L$  אחד מהשני. לתילים התנגדות ליחידת אורך  $r$ . על התילים מניחים מוט מוליך בעל מסה  $m$  וחסר התנגדות המחבר בין הנקודות A ו-D באיור.

המערכת נמצאת בתוך שדה מגנטי  $B$  המאונך לדף אך לא ידוע האם הוא לתוך או החוצה מהדף.

ברגע  $t = 0$  סוגרים את המתג והמוט מתחיל לנוע ימינה.

על המוט פועל חיכוך קינטי ומקדם החיכוך הוא  $\mu$ .

התנגדות הקטע ABCD (כולל המקור) היא  $R_0$ .

ניתן להזניח השפעות של השראות מגנטיות.

א. מהו כיוון השדה המגנטי?

ב. מהו הזרם במעגל כתלות במרחק אותו עבר המוט מתחילת התנועה?

ג. באיזה מרחק תתאפס תאוצת המוט?

ד. תאר את תנועת המוט במילים.

**תשובות סופיות:**

$$.x(t) = V_0 \cdot t, y = \frac{1}{2} \left( -\frac{qB_0 V_0}{m} \right) t^2 : \alpha = \frac{q}{m} B_0^2 \quad (1)$$

$$.x(t) = \frac{V_0}{\sqrt{\frac{q}{m} \left( \frac{qB_0^2}{m} - \alpha \right)}} \sin \left( \sqrt{\frac{q}{m} \left( \frac{qB_0^2}{m} - \alpha \right)} \cdot t \right) : \alpha < \frac{q}{m} B_0^2$$

$$.x(t) = \frac{V_0}{\sqrt{\frac{q}{m} \left( \alpha - \frac{qB_0^2}{m} \right)}} \sinh \left( \sqrt{\frac{q}{m} \left( \alpha - \frac{qB_0^2}{m} \right)} \cdot t \right) : \alpha > \frac{q}{m} B_0^2$$

$$\begin{cases} qB_0 V_y + q\alpha x = m\dot{V}_x \\ -qB_0 V_x + q\alpha y = m\dot{V}_y \\ \dot{x} = V_x \\ \dot{y} = V_y \end{cases} \quad (2)$$

(3) א. B לתוך הדף. ב.  $I = \frac{V_0}{R_0 + 2rx}$  ג.  $x = \frac{1}{2r} \left( \frac{BLV_0}{\mu mg} - R_0 \right)$  ד. ראה סרטון.

# פיזיקה קלאסית 2 (לפיזיקאים)

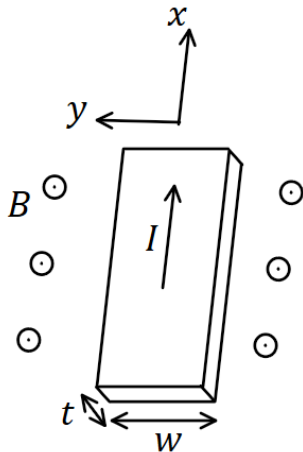
פרק 14 - אפקט הול

תוכן העניינים

81 ..... 1. הסבר ודוגמה

## הסבר ודוגמה:

### שאלות:



- (1) חישוב המתח במוליך מלבני במוליך מלבני זורם זרם  $I$  לאורך המוליך ובמקביל לציר ה- $x$ . רוחב המוליך הוא  $w$  והוא מקביל לציר ה- $y$ . העובי של המוליך הוא  $t$  והוא מקביל לציר ה- $z$  (ראה איור). במרחב קיים שדה מגנטי אחיד בגודל  $B$  ובכיוון  $z$ . מצא את גודל וכיוון המתח בין קצוות המוליך. (הנח שצפיפות האלקטרונים ליחידת נפח נתונה).

### תשובות סופיות:

$$V = \frac{IB}{nq_0 t} \quad (1)$$

# פיזיקה קלאסית 2 (לפיזיקאים)

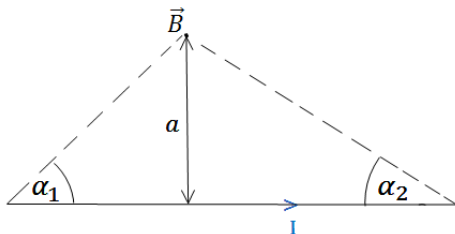
פרק 15 - חוק ביו סבר

תוכן העניינים

82 ..... 1. הרצאות ותרגילים

## הרצאות ותרגילים:

### שאלות:

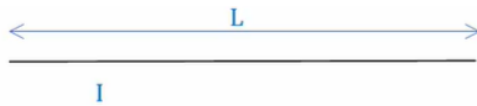


- (1) חישוב שדה של תיל סופי לפי זוויות הראה כי גודלו של השדה המגנטי שיוצר תיל בנקודה הנמצאת במרחק  $a$  מהתיל הוא:

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi a} (\cos \alpha_1 + \cos \alpha_2)$$

כאשר  $I$  הוא הזרם בתיל.

- (2) חישוב שדה של תיל סופי לפי וקטורים



- נתון תיל סופי באורך  $L$  וזרם  $I$ . השדה נמצא במרחק  $y$  מהראשית. חשב את השדה המגנטי של תיל סופי.

- (3) חישוב שדה של טבעת



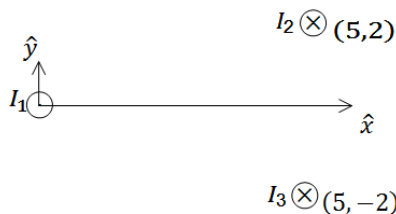
- חשב את השדה המגנטי לאורך ציר הסימטריה של טבעת ברדיוס  $R$  כאשר בטבעת זרם  $I$ .

- (4) חישוב שדה של דיסקה



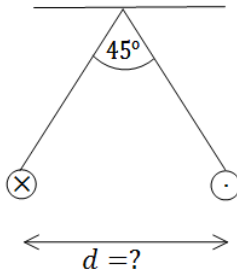
- דיסקה ברדיוס  $R$  טעונה בצפיפות מטען משטחית  $\sigma$ . הדיסקה מסתובבת במהירות זוויתית  $\omega$  סביב ציר הסימטריה שלה. מצא את השדה המגנטי לאורך ציר הסימטריה.

- (5) 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  $y$ ?

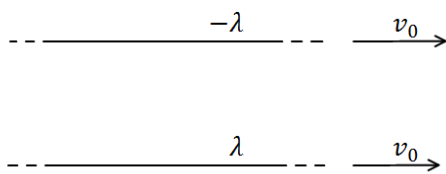


**6) שני תילים תלויים**

שני תילים ארוכים מאוד תלויים מהתקרה באמצעות חוטים באורך זהה ולא ידוע. בתילים זורם 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.

**7) מצולע עם אן צלעות**

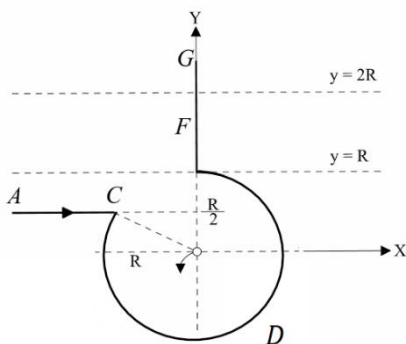
במצולע משוכלל (כל הצלעות שוות) בעל  $n$  צלעות זורם זרם  $I$ . נתון כי המצולע חסום ע"י מעגל ברדיוס  $R$ .  
א. מהו השדה המגנטי במרכז המצולע?  
ב. בדוק עבור  $n \rightarrow \infty$ .



**8) כוח מגנטי מתבטל עם חשמלי**

שני תילים אינסופיים טעונים בצפיפות מטען  $\lambda$  ו- $-\lambda$ . התילים מקבילים ונמשכים במהירות קבועה  $v_0$  ימינה. מצא את גודל המהירות כך שהכוח המגנטי יתבטל עם הכוח החשמלי?

**9) חישוב שדה של תיל מיוחד**



תיל ACDFG כולל חלק מעגלי שרדיוסו  $R$  ושני קטעים ישרים אינסופיים. המשך הקו AC חותך את רדיוס המעגל במרכזו (ראו בשרטוט).

בתיל זורם זרם  $I$ , כיוון הזרם מסומן בשרטוט.

א. מהו גודלו וכיוונו של וקטור השדה המגנטי במרכז החלק המעגלי של התיל?

ב. חלקיק טעון עובר דרך מרכז החלק המעגלי של התיל מסלולו מתעקם עקב השפעת השדה המגנטי של התיל.

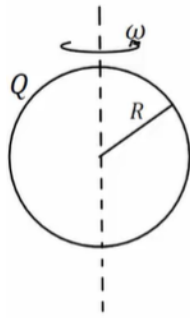
צורת המסלול וכיוון התנועה נתונים בשרטוט. מהו סימן מטענו של החלקיק?

ג. בניסוי נוסף יוצרים שדה מגנטי לא אחיד בכל התחום  $R < y < 2R$ .

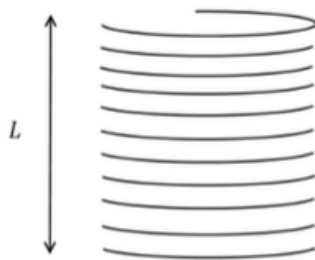
חלק של התיל FG נמצא בתוך תחום זה (ראו בשרטוט).

נתון וקטור השדה  $\vec{B}(0,0, ay^2)$ , כאשר הקבוע  $a$  נתון.

מהו הכוח המגנטי ששדה זה מפעיל על התיל?


**10) שדה במרכז קליפה כדורית מסתובבת**

קליפה כדורית ברדיוס  $R$  טעונה במטען  $Q$  המפולג באופן אחיד על פני הקליפה.  
 הקליפה מסתובבת סביב צירה במהירות זוויתית קבועה  $\omega$ .  
 הנח כי הסיבוב אינו משפיע על התפלגות המטען וחשב את השדה המגנטי במרכז הקליפה.


**11) שדה של סליל סופי**

בסליל סופי באורך  $L$ , רדיוס  $R$  וצפיפות ליפופים אחידה ליחידת אורך  $n$  זורם זרם  $I$ .  
 חשבו את השדה המגנטי ב:  
 א. מרכז הסליל.  
 ב. הקצה העליון של הסליל.

## תשובות סופיות:

(1) שאלת הוכחה.

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi y} \frac{IL\hat{z}}{\left(\left(\frac{L}{2}\right)^2 + y^2\right)^{\frac{1}{2}}} \quad (2)$$

$$B_x = B_y = 0, \quad B_z = \frac{\mu_0 IR^2}{2(R^2 + z^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (3)$$

$$\vec{B}_T = \frac{\mu_0 \sigma w}{2} \left( (R^2 + z^2)^{\frac{1}{2}} + z^2 (R^2 + z^2)^{-\frac{1}{2}} - 2z \right) \quad (4)$$

$$x_1 = -2.76, \quad x_2 = 5.26 \quad (5)$$

$$d = 0.241 \text{ m} \quad (6)$$

$$B = \frac{\mu_0 I}{2R} \quad \text{ב.} \quad B = \frac{n\mu_0 I}{2\pi R} \tan\left(\frac{\pi}{n}\right) \quad \text{א.} \quad (7)$$

$$V = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{sec}} \quad (8)$$

$$\vec{F} = \frac{Ia}{3} 7R^3 \hat{x} \quad \text{ג.} \quad \text{ב. שלילי} \quad B_z = \frac{\mu_0 I}{4\pi R} (2 - \sqrt{3}) \quad \text{א.} \quad (9)$$

$$B_z = \frac{\mu_0 Qw}{6\pi R} \quad (10)$$

$$\frac{\mu_0 InL}{2(R^2 + (L)^2)^{\frac{1}{2}}} \quad \text{ב.} \quad \frac{\mu_0 InL}{2\left(R^2 + \left(\frac{L}{2}\right)^2\right)^{\frac{1}{2}}} \quad \text{א.} \quad (11)$$

# פיזיקה קלאסית 2 (לפיזיקאים)

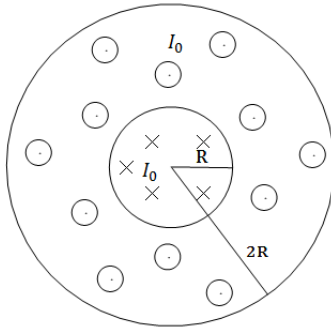
פרק 16 - חוק אמפר

תוכן העניינים

86 ..... 1. הרצאות ותרגילים

## הרצאות ותרגילים:

### שאלות:



#### (1) כבל קו-אקסיאלי

כבל קו-אקסיאלי מורכב מגליל מוליך בעל רדיוס  $R$  ומעטפת מוליכה עבה בעלת רדיוס פנימי  $R$  ורדיוס חיצוני  $2R$  (ניתן להניח כי קיים מבודד דק בין הגליל הפנימי למעטפת). בגליל הפנימי זורם זרם  $I_0$  בצפיפות זרם אחידה לתוך הדף.

- במעטפת זורם גם כן זרם  $I_0$  בצפיפות אחידה החוצה מהדף.
- א. מצא את צפיפות הזרם בגליל ובמעטפת.
- ב. מהו השדה המגנטי בכל המרחב?

#### (2) שדה של מישור דק אינסופי



- נתון מישור אינסופי דק אשר זורם בו זרם. נניח שהמישור טעון בצפיפות מטען  $\sigma$ . המישור מתחיל לנוע בכיוון ציר ה- $x$  במהירות קבועה  $V_0$ . חשב את השדה המגנטי.

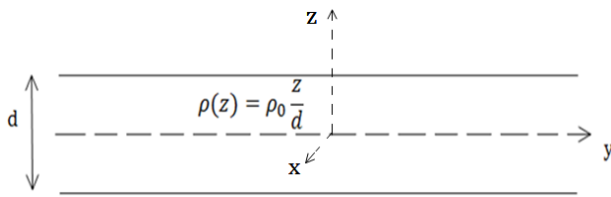
#### (3) שדה של מישור עבה



- מישור אינסופי בעובי  $d$  טעון בצפיפות מטען אחידה ליחידת נפח  $\rho$ . המישור מונח במקביל למישור  $xy$  וראשית הצירים במרכזו. המישור מתחיל לנוע בכיוון ציר ה- $x$  (החוצה מהדף) במהירות קבועה  $V_0$ . מצא את השדה המגנטי מחוץ ובתוך המישור.

#### (4) שדה של סליל אינסופי

- נניח אורך סליל  $l$  ומספר ליפופים כולל של סליל  $N$ . צפיפות הליפופים  $n$ , רדיוס טבעת  $a$  ושטח חתך הסליל של כל טבעת הינו  $S$ . קיימת סימטריה בציר ה- $z$ . חשב את השדה המגנטי.



**(5) מישור עם צפיפות מטען משתנה**

מישור אינסופי בעובי  $d$  טעון בצפיפות מטען משתנה ליחידת נפח

$$\rho(z) = \rho_0 \frac{z}{d}$$

המישור מונח במקביל למישור  $xy$  וראשית הצירים במרכזו.

המישור מתחיל לנוע בכיוון ציר ה- $x$  (החוצה מהדף) במהירות קבועה  $V_0$ . מצא את השדה המגנטי מחוץ ובתוך המישור.

**(6) מישור אינסופי עם צפיפות אקספוננציאלית**

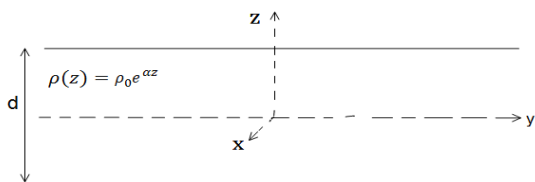
מישור אינסופי בעובי  $d$  טעון בצפיפות מטען משתנה ליחידת נפח

$$\rho(z) = \rho_0 e^{\alpha z}$$

כאשר  $\alpha$  אלפה קבוע.

המישור מונח במקביל למישור  $xy$  וראשית המישור מתחיל לנוע בכיוון ציר ה- $x$  (החוצה מהדף) במהירות קבועה  $V_0$ .

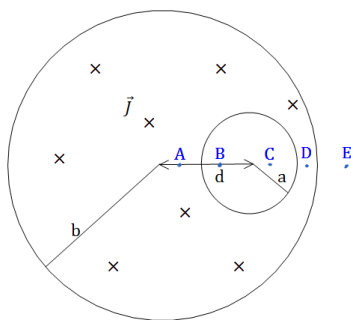
מצא את השדה המגנטי מחוץ ובתוך המישור.



**(7) חור בגליל**

גליל אינסופי ברדיוס  $a$  קודחים חור גלילי ברדיוס  $b$ . מרכז החור נמצא במרחק  $d$  ממרכז הגליל.

בגליל זורם זרם לתוך הדף בצפיפות זרם אחידה ונתונה  $J$ .



א. מצא את השדה המגנטי בנקודות  $A, B, C, D, E$  המסומנות בסרטוט.

הנח כי מרחק הנקודות מהמרכז ידוע וכי כל הנקודות נמצאות על הציר העובר בשני מרכזי הגלילים.

ב. מצא את השדה המגנטי בכל נקודה בתוך החור.

רמז:  $\hat{\theta} = \hat{z} \times \hat{r}$  והשדה בתוך החור אחיד.

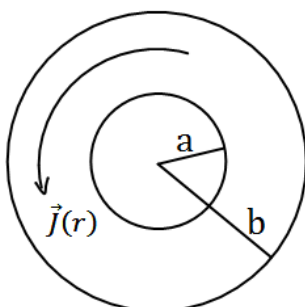
**(8) שדה מגנטי של זרם היקפי**

בגליל אינסופי בעל רדיוס פנימי  $a$  ורדיוס חיצוני  $b$  זורם זרם היקפי בעל צפיפות זרם

$$\vec{J}(r) = Ar^3 \hat{\theta}$$

מצא את השדה המגנטי בכל המרחב.

$A$  קבוע נתון.



## תשובות סופיות:

$$\vec{J}_{in} = \frac{I_0}{\pi R^2} \hat{z} \quad r < R, \quad \vec{J} = \frac{-I_0}{\pi 3R^2} \hat{z} \quad R < r < 2R. \quad \text{א.} \quad (1)$$

$$\vec{B} = \frac{I_0 r}{2\pi R^2} \theta \quad r < R, \quad B=0 \quad R < r < 2R. \quad \text{ב.}$$

$$\vec{B} = \frac{\sigma V_0 \mu_0}{2} \begin{cases} (-\hat{y}) & z > 0 \\ (+\hat{y}) & z < 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$\vec{B} = \rho_0 V_0 z (-\hat{y}), \quad \vec{B} = \frac{\rho V_0 d \mu_0}{2} \begin{cases} -\hat{y} & z > \frac{d}{2} \\ \hat{y} & z < -\frac{d}{2} \end{cases} \quad (3)$$

$$\vec{B} = \mu_0 I n \hat{z} \quad (4)$$

$$\vec{B}=0 \quad z > \frac{d}{2}, \quad \vec{B}=0 \quad z < -\frac{d}{2}, \quad \vec{B} = \frac{\mu_0 \rho_0 V_0}{2d} \left( \left( \frac{d}{2} \right)^2 - z^2 \right) \hat{y} \quad -\frac{d}{2} < z < \frac{d}{2} \quad (5)$$

$$, \quad \vec{B} = \frac{\rho_0 V_0}{2\alpha} \left( e^{-\alpha \frac{d}{2}} - e^{\alpha \frac{d}{2}} \right) \hat{y} \cdot \begin{cases} (+1) & z > \frac{d}{2} \\ (-1) & z < -\frac{d}{2} \end{cases} \quad (6)$$

$$\vec{B} = \frac{\rho_0 V_0}{2\alpha} \left( e^{-\alpha \frac{d}{2}} + e^{\alpha \frac{d}{2}} - 2e^{\alpha z} \right) \hat{y} \quad -\frac{d}{2} < z < \frac{d}{2}$$

$$\vec{B}_A = \frac{\mu_0 J}{2} \left( r + \frac{b^2}{d-r} \right) \hat{\theta}, \quad \vec{B}_B = \frac{\mu_0 J d}{2} \hat{\theta}, \quad \vec{B}_C = \frac{\mu_0 J d}{2} \hat{\theta}, \quad \vec{B}_D = \frac{\mu_0 J r}{2} \hat{\theta} - \frac{\mu_0 J b^2}{2(r-d)} \hat{\theta}. \quad \text{א.} \quad (7)$$

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 J}{2} \hat{z} \times d. \quad \text{ב.} \quad \vec{B}_E = \frac{\mu_0 J a^2}{2r} - \frac{\mu_0 J b^2}{2(r-d)} \hat{\theta}$$

$$\vec{B} = \frac{b^4 - r^4}{4} \mu_0 \hat{z} \quad a < r < b, \quad \vec{B} = A \frac{b^4 - a^4}{4} \mu_0 \hat{z} \quad 0 < r < a \quad (8)$$

# פיזיקה קלאסית 2 (לפיזיקאים)

פרק 17 - מציאת צפיפות זרם משדה מגנטי נתון

תוכן העניינים

1. חוק אמפר הדיפרנציאלי.....89

## חוק אמפר הדיפרנציאלי:

### שאלות:

#### (1) מציאת צפיפות זרם משדה מגנטי נתון

מצא את צפיפות הזרם (משטחית וקווית) היוצרת את השדה המגנטי הבא:

$$\vec{B}_\theta = \begin{cases} Ar + \frac{C}{r} & r < a \\ \frac{D}{r} + \frac{C}{r} & a < r \end{cases}$$

$r$  הוא המרחק מציר ה- $z$  (קואורדינטות גליליות).

#### (2) שדה בכיוון $z$

מצא את צפיפות הזרם (משטחית וקווית) היוצרת את השדה המגנטי הבא:

$$\vec{B} = \begin{cases} (Ar + C)\hat{z} & r < a \\ 0 & a < r \end{cases}$$

$r$  הוא המרחק מציר ה- $z$  (קואורדינטות גליליות).

### תשובות סופיות:

$$\vec{J} = \frac{1}{\mu_0} \begin{cases} (2A + 0)\hat{z} & r < a \\ 0 & a < r \end{cases} \quad (1)$$

$$\vec{J} = \begin{cases} -\frac{A}{\mu_0}\hat{\theta} & r < a \\ 0 & r > a \end{cases} \quad (2)$$

# פיזיקה קלאסית 2 (לפיזיקאים)

פרק 18 - חוק פאראדיי

תוכן העניינים

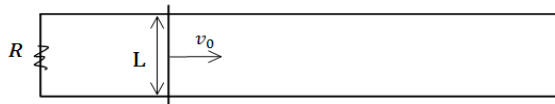
1. הרצאות ותרגילים ..... 90

## הרצאות ותרגילים:

### שאלות:

#### (1) מוט שזז על מסילה

במערכת הבהאה ישנה מסילה המורכבת ממוליכים אידיאליים.



בתחילת המסילה נמצא נגד  $R$ .

המרחק בין פסי המסילה הוא  $L$ .

על המסילה נמצא מוט מוליך

נוסף המחבר בין שני פסי המסילה,

המוט הנוסף נע במהירות קבועה  $V_0$ .

א. מה הכא"מ במעגל?

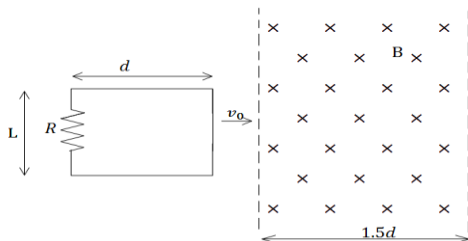
ב. מהו הזרם במעגל?

ג. מה הכוח החיצוני הדרוש על מנת למשוך את המוט במהירות קבועה?

ד. מה ההספק של הכוח החיצוני?

ה. מה ההספק בנגד?

#### (2) מסגרת נעה בתוך שדה



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?

**(3) מסגרת נעה ליד תיל אינסופי**

מסגרת ריבועית מוליכה עם צלע  $a$  נמצאת על מישור  $xy$ .

ונעה במהירות קבועה  $v_0$  בכיוון ציר ה- $x$ .

מיקום המסגרת ב- $t = 0$  הוא  $x_0$ .

תיל אינסופי מונח לאורך ציר ה- $y$  וזורם בו

זרם  $I_0$  בכיוון החיובי של ציר ה- $y$ .

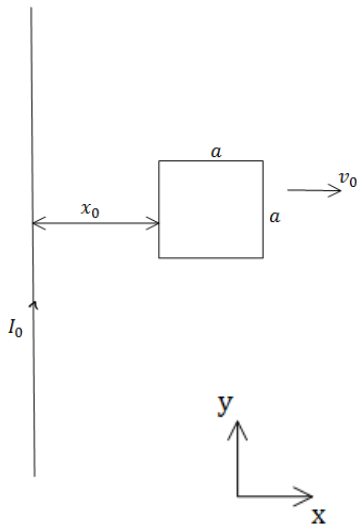
א. מצא את הכא"מ במסגרת.

ב. מצא את הזרם במסגרת אם ידוע

שההתנגדות הכללית שלה היא  $R$ .

ג. מצא את הכוח הדרוש על מנת להזיז את

המסגרת במהירות קבועה.



**(4) טבעת מסתובבת**

טבעת מוליכה ברדיוס  $a$  מונחת במישור  $xy$

ומתחילה להסתובב במהירות זוויתית קבועה  $\omega$

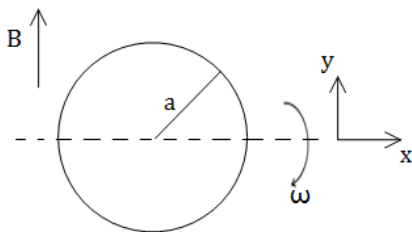
סביב ציר ה- $x$ .

במרחב קיים שדה מגנטי אחיד  $B_0$  בכיוון ציר ה- $y$ .

א. מצא את הכא"מ בטבעת כפונקציה של הזמן.

ב. מצא את הכא"מ בטבעת אם גם השדה המגנטי משתנה בזמן

לפי  $B(t) = B_0 \cos(\omega t)$ .



**(5) מוט זז בתוך מעגל**

מוט מוליך באורך  $L$  נע על צלעותיו של המעגל הבא.

בתוך המעגל קיים שדה מגנטי אחיד

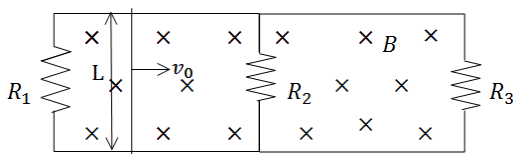
וקבוע לתוך הדף  $B$ .

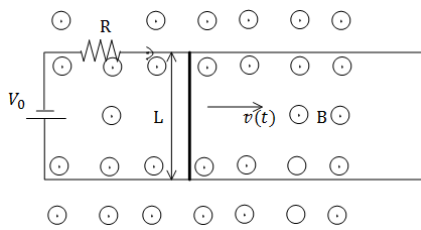
נתונים:  $L, v_0, R_1, R_2, R_3, B$ .

מצא את הזרם משני צידי המוט עבור

המקרה בו המוט נמצא בין הנגד הראשון

לשני ועבור המקרה בו המוט נמצא בין הנגד השני לשלישי.

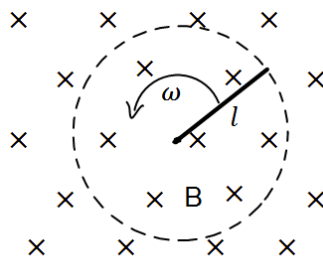




**6) מוט נע על מסגרת עם מקור מתח**

מוט מוליך באורך  $L$  ומסה  $M$  נע על גבי מסילה מוליכה במהירות שאינה קבועה בזמן. למסילה מחוברים נגד בעל התנגדות  $R$  ומקור מתח  $V_0$ .

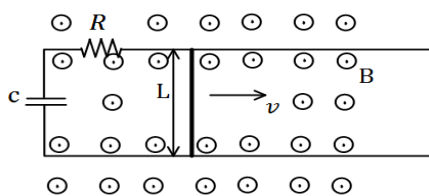
- בכל המרחב קיים שדה מגנטי אחיד  $B$  החוצה מהדף.
- מצא את הכא"מ במוט כתלות במהירות המוט, ומצא את הזרם במעגל גודל וכיוון.
  - רשום משוואת תנועה עבור המוט, מהי מהירותו הסופית.
  - מצא את מהירות המוט כתלות בזמן אם התחיל ממנוחה.
  - מהו הספק החום בנגד?



**7) מוט מסתובב**

מוט בעל אורך  $l$  מסתובב סביב אחד הקצוות שלו במהירות זוויתית קבועה  $\omega$ . המוט נמצא בשדה מגנטי אחיד  $B$  הניצב למישור בו הוא מסתובב.

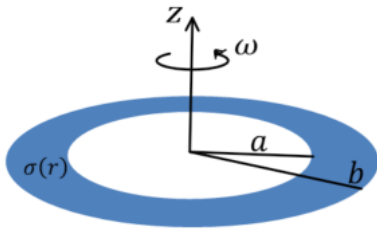
- מצא את המתח בין קצות המוט באמצעות אינטגרציה על חוק לורנץ.
- מצא את המתח במוט באמצעות חוק פאראדיי.



**8) פאראדיי עם קבל ונגד ביחד**

מוט מוליך באורך  $L$  נע על גבי מסילה מוליכה במהירות קבועה בזמן  $v$ . למסילה מחוברים נגד בעל התנגדות  $R$  וקבל בעל קיבול  $C$ .

- בכל המרחב קיים שדה מגנטי אחיד  $B$  החוצה מהדף.
- מצא את הזרם במעגל גודל וכיוון (כתלות בזמן).
  - מה הכוח בו צריך למשוך את המוט על מנת שיישאר במהירות קבועה?
  - מצא מהו ההספק של הכוח הנ"ל (כתלות בזמן).
  - מצא מהו ההספק בנגד ובקבל (כתלות בזמן).
  - הראה כי ההספק של הכוח החיצוני שווה להספק של הקבל והנגד. הסבר מדוע ההספקים שווים.



**9) טבעת בתוך טבעת רחבה**

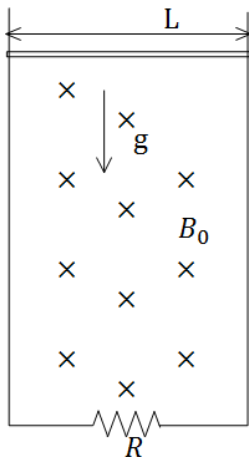
טבעת מבודדת בעלת רדיוס פנימי  $a$  ורדיוס חיצוני  $b$  טעונה בצפיפות מטען משטחית חיובית ולא אחידה.

$$\sigma(r) = \begin{cases} 0 & r < a \\ \sigma_0 \frac{a}{r} & a \leq r \leq b \\ 0 & b < r \end{cases}$$

הטבעת מונחת במישור  $xy$  כך שמרכזה מתלכד עם ראשית הצירים וציר  $z$  עובר דרך מרכז הטבעת ומאונך לפני הטבעת. מסובבים את הטבעת סביב ציר  $z$  (המאונך למישור הטבעת) במהירות זוויתית שהולכת וגדלה עם הזמן לפי הנוסחה  $\omega = at^3$ .

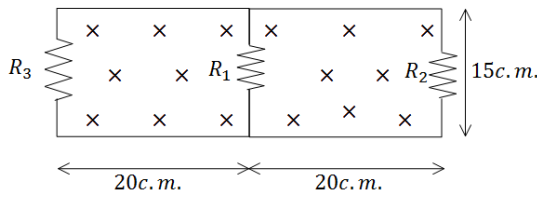
- א. מהו השדה המגנטי במרכז הטבעת?
- ב. במרכז הטבעת מניחים טבעת קטנה ודקה במישור  $xy$  כך שמרכזה מתלכד עם ראשית הצירים ורדיוסה  $r_0$  ( $r_0 \ll a$ ). חשבו את השטף בטבעת הקטנה, מאחר והטבעת הקטנה מאוד קטנה יחסית לטבעת הגדולה תוכלו להזניח את השינוי במרחב של השדה המגנטי העובר דרך הטבעת הקטנה.
- ג. חשבו את הזרם שייווצר בטבעת הקטנה אם התנגדותה  $R$ .

**10) מוט נופל מחובר למסילה**



מוט מוליך מונח על מסילה אנכית ונופל בהשפעת כוח הכובד. במרחב קיים שדה מגנטי  $B_0$  לתוך הדף. רוחב המסילה הוא  $L$  ומסת המוט היא  $M$ . התנגדות המסילה קבועה ושווה ל- $R$ .

- א. מצא את הכא"מ במעגל כתלות במהירות המוט  $v$ .
- ב. מצא את כיוון השדה המושרה ואת כיוון הזרם שנוצר במעגל.
- ג. מצא את הכוח המגנטי הפועל על המוט (עדיין כתלות במהירות).
- ד. רשום משוואת כוחות על המוט. מהי המהירות הסופית של המוט?
- ה. מצא את המהירות והזרם כפונקציה של הזמן.



**11) כא"מ בשני מעגלים**

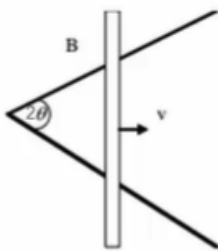
במעגל הבא התנגדות הנגדים היא :

$$R_1 = 1\Omega, R_2 = 2\Omega, R_3 = 3\Omega$$

$$B = 2 \frac{T}{sec} \cdot t$$

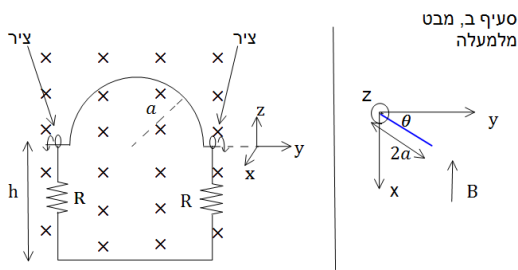
במרחב קיים שדה מגנטי  $B = 2 \frac{T}{sec} \cdot t$  אחיד לתוך הדף. ממדי המעגל נתונים בשרטוט. מצא את הזרם בכל נגד.

**12) מוט נע על מסילות בזווית**



שתי מסילות מוליכות יוצרות זווית  $2\theta$  ביניהן. מוט מוליך מונח עליהן ויוצר משולש שווה שוקיים. המוט נע לאורכם במהירות קבועה  $v$ , ומתחיל את תנועתו בקדקוד המשולש. כל המערכת נמצאת בשדה מגנטי אחיד  $B$  היוצא מהדף. א. מצא את הכא"מ המושרה כפונקציה של הזמן. ב. אם התנגדותו של המוט ליחידת אורך היא  $R_1$ , והמסילות חסרות התנגדות, חשב את הזרם המושרה כפונקציה של הזמן. ג. חשב את ההספק שמועבר למערכת ליצירת הזרם.

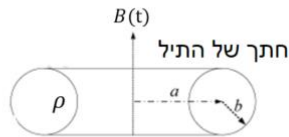
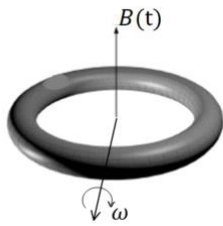
**13) כבל מסתובב**



במערכת הבאה ישנו כבל מוליך אידיאלי בצורת חצי מעגל ברדיוס  $a$ . בשתי הקצוות של חצי המעגל הכבל מחובר לצירים כך שניתן לסובבו סביבם (סביב ציר ה- $y$  בצירור). הצירים מחוברים למסגרת מלבנית בגובה  $h > a$ , המסגרת קבועה במקום. בכל צד של המסגרת קיים נגד  $R$ . במרחב קיים שדה מגנטי אחיד  $B$  לתוך הדף (במינוס  $x$ ).

ב- $t = 0$  הכבל נמצא במצב המתואר בצירור ומתחילים לסובבו סביב הצירים (ציר ה- $y$ ) במהירות זוויתית  $\omega$  (להמחשה, ברגע הראשון כל הנקודות במעגל מתקדמות אלינו). א. מהו הזרם בכבל? ב. נניח כי העמוד השמאלי של המסגרת נמצא בראשית וניתן לסובב את כל המערכת סביב עמוד זה. מצא את הזווית בה צריך לסובב את המסגרת כך שהזרם יקטן פי 2. ג. מצא את הזווית בה צריך לסובב את המסגרת כך שההספק יקטן פי 2.

### 14 גוש נחושת מעוצב לטבעת



נתון גוש נחושת בעל מסה  $m$  צפיפות מסה  $\alpha$  והתנגדות סגולית  $\rho$ . מעבדים את הנחושת לתיל שרדיוס שטח החתך שלו הוא  $b$ . יוצרים מהתיל טבעת שרדיוסה  $a$  כך ש-  $b \ll a$ .

מניחים את הטבעת מקובעת במרחב כך שקיים שדה מגנטי אחיד המשתנה בזמן  $B(t)$  במאונך לטבעת.

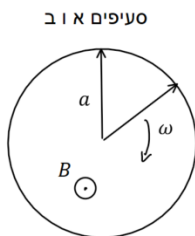
$$\beta = \frac{dB}{dt}$$

א. חשב את הזרם המושרה בטבעת.

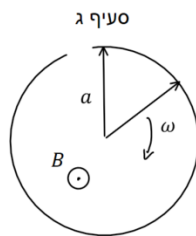
ב. הראה כי אפשר לבטא את הזרם כתלות של  $\beta, \rho, \alpha, m$  וללא תלות במימדי התיל (כלומר אינו תלוי ב- $a$  ו- $b$ ).

ג. כעת מתחילים לסובב את הטבעת במהירות זוויתית  $\omega$  סביב ציר העובר במרכזה ומאונך לשדה המגנטי. חשב את הזרם הנוצר בטבעת כתלות בזמן. האם כעת הוא תלוי במימדי התיל?

### 15 שרון פארדיי



סעיפים א ו ב



סעיף ג

לטבעת מוליכה שאורך מחוגה  $a$  והתנגדותה ליחידת אורך היא  $r$  מחברים שני מחוגים מוליכים שהתנגדות כל אחד מהם היא  $R$ . המחוגים מחוברים אחד לשני במרכז הטבעת ובקצה השני נוגעים בטבעת. מחוג אחד קבוע במקומו והשני מסתובב במהירות זוויתית קבועה  $\omega$ .

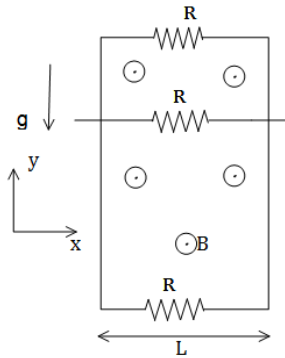
בכל המרחב קיים שדה מגנטי אחיד  $B$  החוצה מהדף.

א. חשבו את ההתנגדות הכוללת של המעגל כתלות בזווית  $\theta$ .

ב. חשבו את גודל וכיוון הזרם כתלות בזמן בכל מחוג עבור הסיבוב הראשון (הניחו שהמוט הנע מתחיל תנועתו בצמוד למוט הנייח).

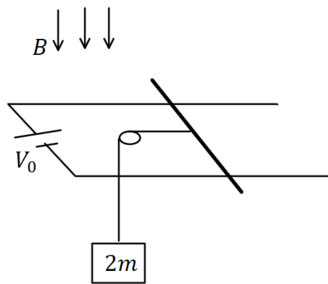
ג. חותכים חתיכה בסוף המעגל של הטבעת (ראה ציור). חזור על סעיף ב.

## 16 נגד נופל במסגרת



מסגרת מלבנית מוליכה, ארוכה מאוד ובעלת רוחב  $L$ , נמצאת בשדה הכובד. אורכה נמצא על ציר ה- $y$  ורוחבה על ציר ה- $x$ . בצלע העליונה ובצלע התחתונה של המסגרת קיימים נגדים עם התנגדות זהה  $R$ . מוט מוליך בעל התנגדות זהה  $R$  מחליק לאורך ציר ה- $y$  על המסגרת. מצא את המהירות הסופית של המוט אם במרחב קיים שדה מגנטי אחיד  $B$  בכיוון  $z$  ונתונה מסת המוט.

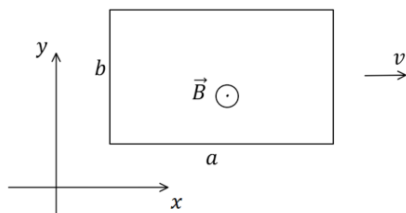
## 17 מוט על מסילה מחובר למשקולת



מוט מוליך בעל אורך  $L$ , מסה  $m$  והתנגדות  $R$  מונח על מסילה אופקית חלקה העשויה משני מוליכים ארוכים מאוד וחסרי התנגדות. המוליכים מחוברים בקצה למקור מתח  $V_0$ . בכל המרחב קיים שדה מגנטי אחיד  $B$  המאונך למישור המסילה וכלפי מטה. משקולת שמסתה  $2m$  מחוברת למוט באמצעות חוט דרך גלגלת אידיאלית.

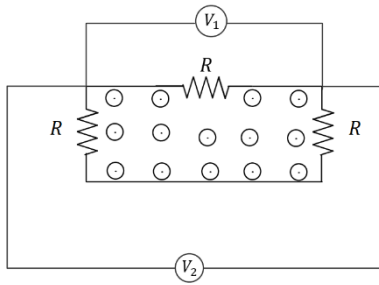
- חשבו את  $V_0$  אם נתון שהמוט במנוחה.
- חותכים את החוט. רשמו משוואת תנועה עבור המוט ומצאו את המהירות המירבית של המוט, מה הזרם במהירות זו?
- מצאו את מהירות המוט כתלות בזמן והשוו לתשובה של סעיף ב.

## 18 מסגרת נעה בשדה מגנטי משתנה לינארית



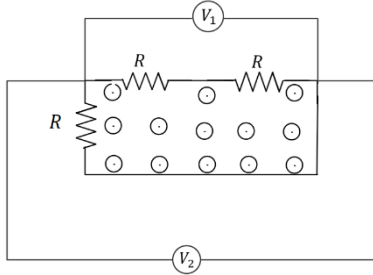
מסגרת מלבנית בגודל  $a \times b$  מסה  $m$  והתנגדות  $R$  נמצאת על מישור  $xy$ . המסגרת נעה באיזור בו קיים שדה מגנטי  $\vec{B}(x) = \alpha(x_0 - x)\hat{z}$  ברגע  $t = 0$  מהירות המסגרת היא  $v_0\hat{x}$  כאשר  $\alpha, x_0, v_0$  קבועים נתונים.

- מצא את הכא"מ בלולאה כתלות במהירות הלולאה. הראה כי הוא אינו תלוי במיקום ההתחלתי של המסגרת.
- מצא את מהירות הלולאה כתלות בזמן.
- מהו המרחק אותו עברה הלולאה עד לעצירתה?



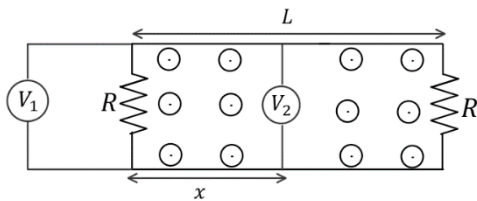
**19) מעגל עם פאראדיי**

במעגל המכיל שלושה נגדים זהים קיים שדה מגנטי משתנה בזמן בחלק הפנימי של המעגל בלבד. אם מד המתח  $V_1$  מורה  $1\text{mV}$  מה מורה מד המתח  $V_2$ ?



**20) מעגל עם פאראדיי 2**

במעגל המכיל שלושה נגדים זהים קיים שדה מגנטי משתנה בזמן בחלק הפנימי של המעגל בלבד. אם מד המתח  $V_1$  מורה  $1\text{mV}$  מה מורה מד המתח  $V_2$ ?



**21) מעגל עם פאראדיי 3**

במעגל הבא שני נגדים זהים. בין הנגדים (ורק ביניהם) קיים שדה מגנטי אחיד המשתנה בזמן. המרחק בין הנגדים הוא  $L$ . מחברים שני מדי מתח אידיאליים כפי שמתואר באיור כאשר  $x$  הוא המרחק של מד המתח  $V_2$  מהנגד השמאלי. נתון כי מד המתח  $V_1$  מודד  $1\text{mV}$ . מה ימדוד מד המתח  $V_2$  אם:

א.  $x = \frac{1}{2}L$

ב.  $x = \frac{1}{4}L$

## תשובות סופיות:

$$\vec{F}_{0,xt} = \frac{B_0^2 L^2 V_0}{R} \hat{x} \quad \text{ג.} \quad I = \frac{BLV_0}{R} \quad \text{ב.} \quad \varepsilon = -BLV_0 \quad \text{א.} \quad (1)$$

$$\rho_R = \frac{BLV}{R} \quad \text{ה.} \quad \rho_{\text{ext}} = \frac{B_0^2 L^2 V_0}{R} \quad \text{ד.}$$

$$\vec{F}_{\text{ext}} = \frac{B^2 L^2 V_0}{R} \hat{x} \quad \text{ג.} \quad I = \frac{BLV_0}{R} \quad \text{ב.} \quad |\varepsilon| = BLV_0 \quad \text{א.} \quad (2)$$

$$\rho_{\text{ext}} = \frac{B^2 L^2 V_0^2}{R} \quad \text{ד.}$$

$$I = \frac{-\frac{\mu_0 I_0 a}{2\pi} \left( \frac{1}{x+a} - \frac{1}{x} \right) V_0}{R} \quad \text{ב.} \quad \varepsilon = -\frac{\mu_0 I_0 a}{2\pi} \left( \frac{1}{x+a} - \frac{1}{x} \right) V_0 \quad \text{א.} \quad (3)$$

$$|\vec{F}| = F_1 - F_2 \quad \text{ג.}$$

$$\varepsilon = \omega B_0 \pi a^2 \sin(2\omega t) \quad \text{ב.} \quad \varepsilon = -B_0 \pi a^2 (-\omega) \sin(\omega t) \quad \text{א.} \quad (4)$$

$$I_L = I_1, \quad I_R = I_2 + I_3 \quad \text{בין הראשון לשני:} \quad (5)$$

$$I_L = I_1 + I_2, \quad I_R = I_3 \quad \text{בין השני לשלישי:}$$

$$a = \frac{BL}{MR} (-BLV(t) + V_0), \quad V_{\text{final}} = \frac{V_0}{BL} \quad \text{ב.} \quad |\varepsilon| = BLV(t) \quad \text{א.} \quad (6)$$

$$P_R = \left( \frac{BLV(t) - V_0}{R} \right)^2 R \quad \text{ד.} \quad V(t) = \frac{V_0}{BL} \left( 1 - e^{-\frac{B^2 L^2 t}{MR}} \right) \quad \text{ג.}$$

$$\varepsilon = -B \cdot \omega \frac{l^2}{2} \quad \text{ב.} \quad \varepsilon = B \frac{l^2}{2} \omega \quad \text{א.} \quad (7)$$

$$P_F = \frac{B^2 L^2 V^2}{R} e^{-\frac{t}{RC}} \neq I^2 R \quad \text{ג.} \quad F_{\text{ext}} = \frac{B^2 L^2 V}{R} e^{-\frac{t}{RC}} \hat{x} \quad \text{ב.} \quad I(t) = \frac{BLV}{R} e^{-\frac{t}{RC}} \quad \text{א.} \quad (8)$$

$$\text{ה. הוכחה} \quad P_R = \frac{B^2 L^2 V^2}{R} e^{-\frac{2t}{RC}}, \quad P_C = \frac{B^2 L^2 V^2}{R} \left( e^{-\frac{t}{RC}} - e^{-\frac{2t}{RC}} \right) \quad \text{ד.}$$

$$\varphi = \mu_0 \sigma_0 a \omega \frac{1}{2} \ln \frac{b}{a} \pi r_0^2 \quad \text{ב.} \quad \vec{B} = \mu_0 \sigma_0 a \omega \cdot \frac{1}{2} \ln \frac{b}{a} \hat{z} \quad \text{א.} \quad (9)$$

$$I = \frac{3\mu_0 \sigma_0 a \pi r_0^2 \alpha \ln \frac{b}{a}}{2R} \quad \text{ג.}$$

$$\text{ב. כיוון השדה המושרה בכיוון השדה שקיים, לתוך הדף.} \quad |\varepsilon| = B_0 L V_y \quad \text{א.} \quad (10)$$

$$V(t) = \left( 1 - e^{-\frac{k}{m} t} \right) \frac{mg}{k}, \quad k = \frac{B_0^2 L^2}{R} \quad \text{ה.} \quad V_{\text{final}} = \frac{mgR}{B_0^2 \cdot L^2} \quad \text{ד.} \quad F = \frac{B_0^2 L^2}{R} V \hat{y} \quad \text{ג.}$$

$$I_{R1} = \frac{0.6}{110} \text{ A}, I_{R2} = \frac{3}{110} \text{ A}, I_{R3} = \frac{2.4}{110} \text{ A} \quad (11)$$

$$P_{\text{out}} = \frac{V^2 B^2}{R_1} 2 \cdot V \cdot t \cdot \tan \theta \quad . \lambda \quad I = \frac{V \cdot B}{R_1} \quad . \text{ב} \quad \varepsilon = 2V^2 \tan \theta t B \quad . \aleph \quad (12)$$

$$\theta = 45^\circ \quad . \lambda \quad \theta = 60^\circ \quad . \text{ב} \quad I = \frac{B \pi a^2 \omega}{4R} \sin \omega t \quad . \aleph \quad (13)$$

$$I = \frac{m(\beta \cos \theta - B \sin \theta \omega)}{4\rho \alpha \pi} \quad . \lambda \quad I = \frac{\beta m}{4\pi \rho \alpha} \quad . \text{ב} \quad I = \frac{\beta \pi b^2 a}{2\rho} \quad . \aleph \quad (14)$$

$$R_T = 2R + \frac{\arctan(2\pi - \theta)}{2\pi} \quad . \aleph \quad (15)$$

$$\hat{f} \quad . \text{ב} \quad I_T = \frac{B \omega a^2 \pi}{4\pi R + \arctan(2\pi - \omega t)} \quad . \text{ב}$$

$$I(t) = \frac{B \omega \frac{a^2}{2}}{2R + \arctan \omega t} \quad . \lambda$$

$$V = \frac{3Rmg}{2B^2 L^2} \quad (16)$$

$$\frac{BL}{R}(V_0 - BLV) = ma, V_{\text{max}} = \frac{V_0}{BL} \quad . \text{ב} \quad V_0 = \frac{2mgR}{BL} \quad . \aleph \quad (17)$$

$$V(t) = \frac{V_0}{BL} \left( 1 - e^{-\frac{B^2 L^2}{MR} t} \right) \quad . \lambda$$

$$\Delta x = \frac{V_0}{k} \quad . \lambda \quad V(t) = V_0 e^{-kt} \quad . \text{ב} \quad |\varepsilon| = \alpha b a V \quad . \aleph \quad (18)$$

$$1 \text{ mV} \quad (19)$$

$$0.5 \text{ mV} \quad (20)$$

$$0.5 \text{ mV} \quad . \text{ב} \quad 0 \quad . \aleph \quad (21)$$

# פיזיקה קלאסית 2 (לפיזיקאים)

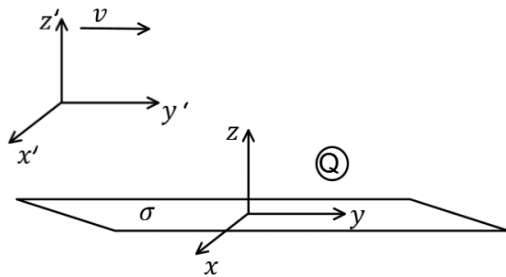
פרק 19 - טרנספורמציה יחסותית (לורנץ) לשדות החשמלי והמגנטי

תוכן העניינים

1. הסבר ותרגילים.....100

## הסבר ותרגילים:

### שאלות:



#### (1) מטען מעל מישור אינסופי

מטען  $Q$  מונח מעל מישור אינסופי הטעון בצפיפות מטען אחידה ליחידת שטח  $\sigma$ .

נבחר את הצירים כך שהמישור הטעון יהיה על פני מישור  $xy$ .

מצא את הכוח, הגודל והכיוון, הפועל

על המטען ביחס לצופה הנע במהירות  $v$  בכיוון  $y$  באותו

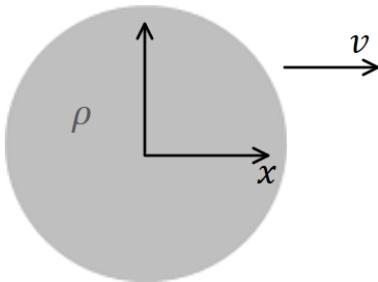
הרגע שהמטען מונח (כלומר ברגע שבו המטען עדיין במנוחה ביחס למישור).

#### (2) שדה של כדור טעון נע

כדור מבודד טעון בצפיפות מטען אחידה  $\rho$ .

הכדור נע במהירות  $v$  בכיוון ציר ה- $x$ .

מצא את השדה החשמלי והמגנטי בתוך הכדור וביחס למעבדה, בדיוק ברגע שבו מרכז הכדור עובר את ראשית הצירים במערכת המעבדה.



# פיזיקה קלאסית 2 (לפיזיקאים)

פרק 20 - טרנספורמציה יחסותית של השדות עם נוסחאות מלאות

תוכן העניינים

101 .....1. הסברים ודוגמאות

## הסברים ודוגמאות:

### שאלות:

- (1) שדה בכיוון  $Z$  במערכת הצופה שנע צופה הנע במהירות  $V$  בכיוון ציר  $x$  ביחס למעבדה מודד שדה חשמלי  $E_0$  בכיוון ציר  $z$ , ושדה מגנטי אפס. מהם השדות המגנטי והחשמלי שימדוד הצופה במעבדה?
- (2) חישוב שדות וצפיפויות בשתי דרכים מישור אינסופי טעון בצפיפות מטען ליחידת שטח  $\sigma$ . המישור מתחיל לנוע במהירות קבועה  $\vec{v} = v\hat{x}$  ביחס למעבדה. בתרגיל זה נמצא את השדות והצפיפויות במערכת המעבדה בשתי דרכים: דרך ראשונה:
- א. מצא את השדה החשמלי והמגנטי במערכת המישור תוך שימוש בצפיפות המטען של המישור.
- ב. מצא את השדה החשמלי והמגנטי במערכת המעבדה באמצעות טרנספורמציה של השדות שמצאת בסעיף א.
- ג. מצא את צפיפות המטען וצפיפות הזרם במערכת המעבדה באמצעות השדות שמצאת בסעיף ב.
- דרך שניה:
- ד. מצא את צפיפות המטען וצפיפות הזרם במערכת המעבדה תוך שימוש בצפיפות המטען במערכת המישור בלבד. השווה לסעיף ג.
- ה. מצא את השדה החשמלי והמגנטי במערכת המעבדה, מצפיפויות המטען שמצאת בסעיף ד. השווה לסעיף ב.

### תשובות סופיות:

$$\vec{E} = \gamma E_0 \hat{z}, \quad \vec{B} = \gamma \cdot \frac{1}{c^2} v E_0 (-\hat{y}) \quad (1)$$

$$\vec{E} = \frac{\gamma \sigma}{2\epsilon_0} \hat{z}, \quad \vec{B} = \frac{-\gamma \sigma v}{2c^2 \epsilon_0} \hat{y} \quad \text{ב.} \quad \vec{E}' = \frac{\sigma}{2\epsilon_0} \hat{z}, \quad \vec{B}' = 0 \quad \text{א.} \quad (2)$$

$$\sigma = \gamma \sigma, \quad \vec{k} = \gamma \sigma v \hat{x} \quad \text{ג.} \quad \sigma = \gamma \sigma, \quad \vec{k} = \gamma \sigma v \hat{x} \quad \text{ד.}$$

$$\vec{E} = \frac{\gamma \sigma}{2\epsilon_0} \hat{z}, \quad \vec{B} = -\frac{\mu_0 \gamma \sigma v}{2} \hat{y} \quad \text{ה.}$$

# פיזיקה קלאסית 2 (לפיזיקאים)

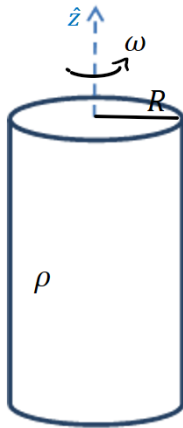
פרק 21 - שדות משתנים בזמן

תוכן העניינים

1. הסברים ותרגילים.....102

## הסברים ותרגילים:

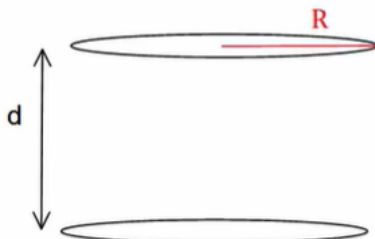
### שאלות:



#### (1) גליל טעון מסתובב בתאוצה

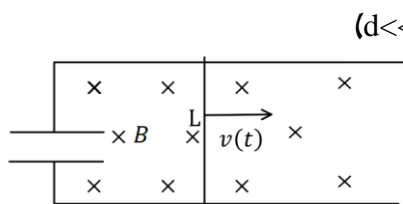
- גליל אינסופי מלא ברדיוס  $R$  טעון בצפיפות מטען אחידה ליחידת נפח  $\rho$ .  
 הגליל מסתובב סביב ציר הסימטריה שלו במהירות זוויתית המשתנה בזמן  $\omega = \alpha t$  כאשר  $\alpha$  קבועה ונתונה.
- מה השדה המגנטי בכל המרחב?
  - מה השדה החשמלי בכל המרחב?
  - מה הכוח שפועל על מטען?

#### (2) שדה חשמלי תלוי בזמן בתוך קבל לוחות ווקטור פוינטינג על השפה



- קבל לוחות מורכב משני לוחות עגולים ברדיוס  $R$  המקבילים זה לזה ונמצאים במרחק  $d$  אחד מהשני  $d \ll R$ .  
 הקבל מחובר למעגל חשמלי המספק לקבל זרם  $I$  קבוע (ונתון).
- מצא את המטען על הקבל כפונקציה של הזמן אם נתון ש- $q(t=0) = 0$ .
  - מצא את השדה החשמלי כפונקציה של הזמן.
  - מצא את השדה המגנטי כפונקציה של הזמן והמיקום, בתוך הקבל ומחוץ לו.
  - מצא את האנרגיה האגורה בין הלוחות.
  - מצא את הווקטור פוינטינג על שפת הקבל וחשב את השטף שלו על מעטפת הקבל.

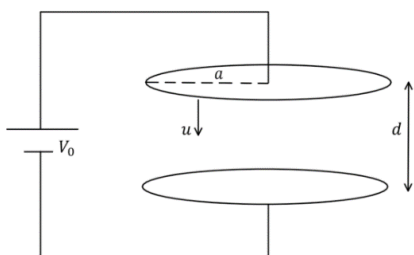
**(3) פארדיי עם קבל**



קבל לוחות מעגלי ברדיוס  $a$  ומרחק בין הלוחות ( $d \ll a$ ) מחובר למסילה מוליכה חסרת התנגדות. על המסילה מונח מוט חסר התנגדות באורך  $L$ . מושכים את המוט כך שהוא מתרחק מהקבל במהירות  $v(t) = At$ .

- במרחב קיים שדה מגנטי  $B$  אחיד וקבוע לתוך הדף.
- מהו המטען על הקבל? על איזה לוח המטען החיובי?
  - מהו השדה החשמלי בתוך הקבל?
  - מהו השדה המגנטי בתוך הקבל ומחוץ לו, גודל וכיוון (התעלם מהשדה שנוצר ע"י התיילים והמוט)?
  - מהו הכוח שיש להפעיל על המוט על מנת שינוע במהירות הנתונה אם מסת המוט היא  $M$ ?

**(4) לוחות בקבל מתקרבים בזמן**



קבל לוחות מורכב משני לוחות מעגליים ברדיוס  $a$  ומרחק  $d \ll a$  ביניהם.

הקבל מחובר למקור מתח קבוע  $V_0$ . בזמן  $t = 0$  מתחילים לקרב את הלוח העליון אל התחתון במהירות קבועה ונמוכה  $u$ .

- מהו המתח בין לוחות הקבל כתלות בזמן?
- מהו השדה החשמלי בין לוחות הקבל כתלות בזמן?
- מהו השדה המגנטי בין לוחות הקבל ומחוץ להן כתלות בזמן?
- חזור על כל הסעיפים אם ניתקו את הקבל מהמקור רגע לפני תחילת ההזזה של הלוח.

## תשובות סופיות:

$$\vec{B}=0 \quad r > R, \quad \vec{B}=\mu_0\rho\omega\frac{R^2-r^2}{2}\hat{z} \quad r < R \quad \text{א. (1)}$$

$$\vec{E}=\frac{-\mu_0\rho\alpha}{2r}\left(\frac{R^4}{4}\right)\hat{\theta}+(E_r)\hat{r} \quad r > R, \quad \vec{E}=-\mu_0\rho\alpha\frac{1}{2r}\left(R^2\frac{r^2}{2}-\frac{r^4}{4}\right)\hat{\theta}+E_r(r)\hat{r} \quad r < R \quad \text{ב.}$$

$$\vec{F}=q\vec{E} \quad \text{ג.}$$

$$\vec{B}=\frac{-\mu_0 I r}{2\pi R^2}\hat{\theta} \quad \text{ג.} \quad \vec{E}=\frac{-q(t)}{\varepsilon_0\pi R^2}\hat{z} \quad \text{ב.} \quad q(t)=It \quad \text{א. (2)}$$

$$\phi_s=\frac{-I^2 t d}{\varepsilon_0\pi R^2}, \quad \vec{S}=\frac{-1}{\mu_0}\cdot\frac{q(t)}{\varepsilon_0\pi R^2}\frac{\mu_0 I R}{2\pi R^2}\hat{r} \quad \text{ה.} \quad U=\frac{I^2 t^2 d}{2\varepsilon_0\pi R^2}+\frac{\mu_0 I^2 d}{16\pi} \quad \text{ד.}$$

$$\vec{B}=\frac{\mu_0\varepsilon_0 B_0 L A r}{2d}\hat{\theta} \quad r < a \quad \text{ג.} \quad \vec{E}=\frac{B L A t}{d}\hat{z} \quad \text{ב.} \quad \text{עליון, } q_c=\frac{\varepsilon_0\pi a^2}{d}B L A t \quad \text{א. (3)}$$

$$F=MA+\frac{\varepsilon_0\pi a^2}{d}B_0^2 L^2 A \quad \text{ד.} \quad \vec{B}=\frac{\mu_0\varepsilon_0 B L A a^2}{2dr}\hat{\theta} \quad a < r$$

$$\vec{B}=\frac{\mu_0\varepsilon_0 V_0 u r \hat{\theta}}{2(d-ut)^2} \quad r < a \quad \text{ג.} \quad \vec{E}=\frac{-V_0 \hat{z}}{d-ut} \quad \text{ב.} \quad V_c(t)=V_0 \quad \text{א. (4)}$$

$$V_c(t)=\frac{d-ut}{d}\cdot V_0, \quad \vec{E}=\frac{-V_0 \hat{z}}{d}, \quad \vec{B}=0 \quad \text{ד.} \quad \vec{B}=\frac{\mu_0\varepsilon_0 V_0 u a^2 \hat{\theta}}{2(d-ut)^2 r} \quad r > a$$

# פיזיקה קלאסית 2 (לפיזיקאים)

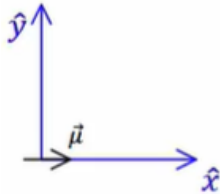
פרק 22 - מומנט דיפול מגנטי

תוכן העניינים

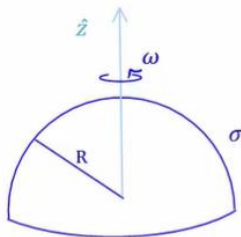
1. הסברים ותרגילים ..... 105

## הסברים ותרגילים:

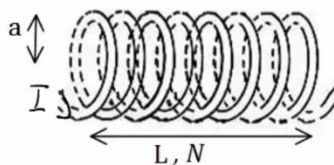
### שאלות:



- (1) מטען מסתובב סביב דיפול בראשית נתון דיפול מגנטי הממוקם בראשית  $\mu = (\mu, 0, 0)$ . מצא את  $\mu$  כך שאלקטרון הממוקם בנקודה  $(0, -a, 0)$  עם מהירות  $(0, 0, v)$  יבצע תנועה מעגלית.



- (2) חצי קליפה כדורית מסתובבת חצי קליפה כדורית, טעונה בצפיפות מטען משטחית  $\sigma$  ומסתובבת סביב ציר  $z$ . מצא את מומנט הדיפול המגנטי של הקליפה.



- (3) מומנט דיפול מגנטי של סליל חשב את מומנט הדיפול המגנטי של סליל.

### תשובות סופיות:

$$|e| \frac{\mu_0 \cdot \mu}{4\pi a^2} = m_e v \quad (1)$$

$$\vec{\mu} = \frac{2\pi R^4}{3} \sigma \omega \cdot \hat{z} \quad (2)$$

$$\mu_T = NI\pi a^2 \quad (3)$$

# פיזיקה קלאסית 2 (לפיזיקאים)

פרק 23 - השראות

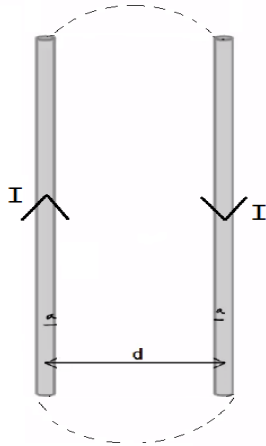
תוכן העניינים

106 .....	1. השראות עצמית
109 .....	2. השראות הדדית

## השראות עצמית:

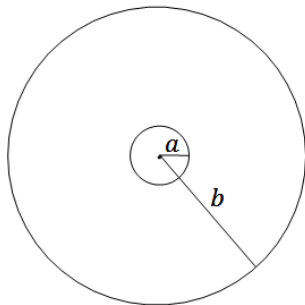
### שאלות:

#### (1) שני תיילים ארוכים



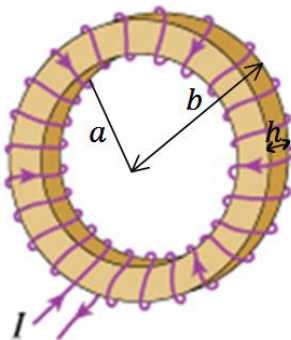
נתונים שני תיילים מאוד ארוכים שהמרחק ביניהם הוא  $d$ . רדיוס כל אחד מהתיילים הוא  $a$  ונתון שהתיילים מחוברים ביניהם באינסוף. נתון זרם  $I$  במערכת. הנח כי  $d \gg a$  והתיילים אינם משפיעים אחד על השני. חשבו השראות של המערכת ליחידת אורך. ניתן להזניח את השדה בתוך התיילים.

#### (2) השראות בכבל קואקסיאלי



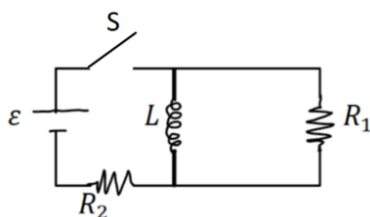
כבל קו אקסיאלי מורכב מתיל פנימי ברדיוס  $a$  ומעטפת דקה ברדיוס  $b$ . התיל והמעטפת באורך  $l \gg a, b$ . בתיל הפנימי זרם  $I$  נתון, ובמעטפת זרם זהה בכיוון ההפוך. מצאו את ההשראות העצמית ליחידת אורך של המערכת. הזנח את השדה המגנטי בתוך התיל הפנימי.

#### (3) השראות בטורואיד



בתמונה נתון טורואיד. הרדיוס הפנימי של הטורואיד הוא  $a$  והחיצוני  $b$ . גובה (או עובי) הטורואיד הוא  $h$  ומספר הליפופים  $N$ . א. מצאו את ההשראות של הטורואיד. ב. מצאו את האנרגיה האגורה בטורואיד אם זרם בו זרם  $I$ .

#### (4) תרגיל 1 ב-RL

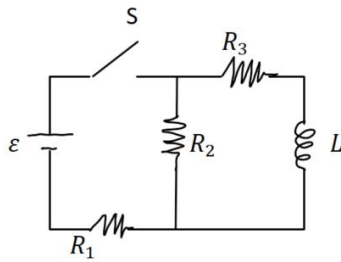


במעגל הבא המפסק סגור זמן רב, התנגדות הנגדים והשראות הסליל נתונה.  
א. מצאו את הזרם בכל נגד ואת הזרם בסליל.  
ב. פותחים את המפסק, מהו הזרם ברגע פתיחת המפסק ולאחר זמן רב?  
ג. מהו הזרם כתלות בזמן לאחר פתיחת המפסק?

**5) תרגיל 2 ב-RL**

במעגל הבא מתקיים:

$\epsilon = 5V, R_1 = 100\Omega, R_2 = 200\Omega, R_3 = 300\Omega, L = 30mH$



א. מה המתח שמייצר הסליל עם סגירת המפסק?

ב. מה הזרם בכל נגד לאחר זמן רב?

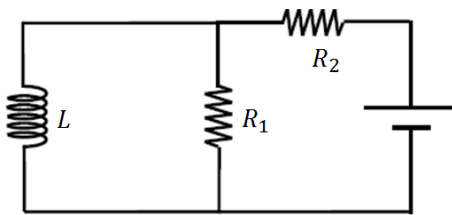
ג. מהו קבוע הזמן של המעגל?

**6) תרגיל 3 ב-RL**

במעגל הבא נתון כא"מ המקור, התנגדות הנגדים והשראות הסליל.

מצאו את הזרם בסליל כפונקציה של הזמן אם  $\epsilon$

נתון שהזרם בו שווה לאפס ב- $t=0$ .



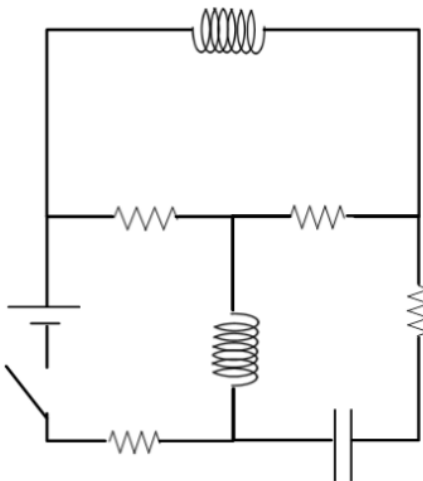
**7) תרגיל 4 ב-RL**

במעגל הבא התנגדות כל הנגדים היא R ומתח הסוללה הוא V (R ו-V נתונים).

א. מצאו את הזרם בסוללה ברגע סגירת המתג (הניחו שהקבל אינו טעון ואין זרמים במעגל לפני סגירת המתג).

ב. מצאו את הזרם בסוללה ובסלילים לאחר זמן רב. מהו המתח על הקבל?

ג. חזרו על סעיפים א ו-ב אם במקום כל סליל היה קבל ובמקום הקבל היה סליל.



## תשובות סופיות:

$$L = \frac{\mu_0}{\pi} \ln \frac{d-a}{a} \quad (1)$$

$$\frac{L}{l} = \frac{\mu_0 \ln \frac{b}{a}}{2\pi} \quad (2)$$

$$L = \frac{\mu_0 N^2 h \ln \frac{b}{a}}{2\pi} \quad (3)$$

$$U_L = \frac{1}{2} LI^2 \quad \text{ב.}$$

$$I_L(0) = I_1 = \frac{\varepsilon}{R_2}, \quad I_L(\infty) = 0 \quad \text{ב.} \quad I_L = I_2 = \frac{\varepsilon}{R_2}, \quad I_1 = 0 \quad \text{א.} \quad (4)$$

$$I(t) = \frac{\varepsilon}{R_2} e^{-\frac{t}{\tau}} \quad \text{ג.}$$

$$I_1 = 22.7 \text{mA}, \quad I_2 = 13.6 \text{mA}, \quad I_3 = 9.09 \text{mA} \quad \text{ב.}$$

$$V_L = 3.3 \text{V} \quad \text{א.} \quad (5)$$

$$\tau = 81.7 \mu\text{s} \quad \text{ג.}$$

$$I_3(t) = \frac{\varepsilon}{R_2} \left( 1 - e^{-\frac{RT}{L}t} \right) \quad (6)$$

$$\frac{V}{4R} \quad \text{א.} \quad (7)$$

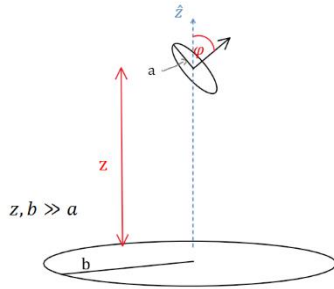
$$\text{ב. סוללה: } I = \frac{2V}{3R}, \quad \text{סליל עליון: } I = \frac{V}{3R}, \quad \text{סליל תחתון: } I = \frac{2V}{3R}, \quad \text{קבל: } V = \frac{V}{3}$$

$$\text{ג. א: } I = \frac{2V}{3R}, \quad \text{ב: סוללה: } I = \frac{V}{4R}, \quad \text{סליל: } I = \frac{V}{4R}, \quad \text{קבל עליון: } V = \frac{V}{2},$$

$$\text{קבל תחתון: } V = \frac{V}{2}$$

## השראות הדדיות:

### שאלות:



#### 1) טבעת בזווית מעל טבעת גדולה

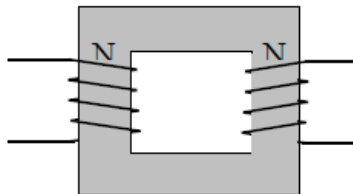
טבעת ברדיוס  $b$  מונחת על מישור  $x - y$  במקביל לקרקע. טבעת נוספת ברדיוס  $a$  שקטן מאוד ביחס ל- $b$  מונחת בגובה  $z$  מעל מישור  $x - y$ . מרכזי הטבעות נמצאים על ציר ה- $z$  אחד מעל השני. הטבעת הקטנה גם מוטת ביחס למישור  $x - y$  כך שהוקטור המאונך למישור הטבעת יוצר זווית  $\varphi$  עם ציר ה- $z$ .

א. מצא את  $M_{1,2}$ .

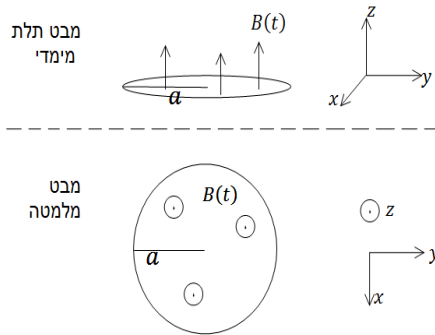
ב. התנגדות הטבעת הקטנה נתונה ומסומנת ב- $R_a$ . כמו כן ידוע הזרם כתלות בזמן בטבעת הגדולה והוא שווה ל- $I_b = I_0 \cos(\omega t)$ .  $I_0$  ו- $\omega$  קבועים נתונים. מצא את הזרם בטבעת הקטנה.

ג. מהו מומנט הכוח הפועל על הטבעת הגדולה?

#### 2) שנאי



שנאי מורכב משני סלילים בעלי מספר ליפופים שונה המקיפים ליבה מגנטית מלבנית משני צידי הליבה. הנח כי ליבה מגנטית שומרת את כל קווי השדה המגנטי בתוכה, או לחלופין, כי השטף המגנטי אחיד בכל חתך של הליבה. נתון כי המתח על הסליל השמאלי הוא מתח חילופין (מתח מהצורה  $V(t) = V_0 \sin \omega t$ ). מצא את המתח על הסליל הימני כתלות במתח של הסליל השמאלי. נתון  $N_1, N_2$  מספר הליפופים בכל סליל.



**3) שטף חיצוני השראות ונגד בטבעת**

טבעת מוליכה ברדיוס  $a$  והתנגדות  $R$  נמצאת בתוך שדה מגנטי אחידה במרחב ומשתנה בזמן  $B(t) = At$  כאשר  $A$  קבוע חיובי. כיוון השדה בניצב למישור בו נמצאת הטבעת (השטף מקסימאלי).

א. מצא את סך הכא"מ הפועל על הטבעת כתלות בזרם, אם ההשראות העצמית של הטבעת  $L$  נתונה.

ב. מצא משוואה על הזרם כתלות בזמן ופתור אותה למציאת הזרם כתלות בזמן. (היעזר בפתרון של סליל במעגל טעינה).

ג. מצא את הזרם והשטף הכולל כתלות בזמן בקירוב  $R \rightarrow 0$ , התעלם מהרגעים הראשונים.

**תשובות סופיות:**

$$I_a = \frac{-MI_0(-\omega \sin \omega t)}{R_a} \quad \text{ב.} \quad M = \frac{\mu_0 b^2 \pi a^2 \cos \varphi}{2} (b^2 + z^2)^{-\frac{3}{2}} \quad \text{א.} \quad (1)$$

$$|\vec{\tau}| = \mu_a B_z \sin \varphi \quad \text{ג.}$$

$$\epsilon_2 = \frac{N_2}{N_1} V_0 \sin \omega t \quad (2)$$

$$I(t) = -\frac{A\pi a^2}{R} \left(1 - e^{-\frac{R}{L}t}\right) \quad \text{ב.} \quad \epsilon = -A\pi a^2 - LI \quad \text{א.} \quad (3)$$

$$\phi_{BT} = 0, \quad I(t) = -\frac{A\pi a^2}{L} t \quad \text{ג.}$$

# פיזיקה קלאסית 2 (לפיזיקאים)

פרק 24 - הפוטנציאל הוקטורי

תוכן העניינים

1. הרצאות ותרגילים ..... 111

## הרצאות ותרגילים:

### שאלות:

**(1) מצא צפיפות מפוטנציאל**

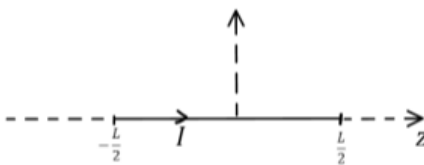
מצא את צפיפות הזרם שיצרה את הפוטנציאל הוקטורי  $\vec{A} = C\hat{\phi}$  בקואורדינטות גליליות, כאשר  $C$  קבוע.

**(2) פוטנציאל וקטורי של תיל סופי**

תיל סופי באורך  $L$  נושא זרם  $I$  מונח לאורך ציר ה- $z$ .

א. מצא את הפוטנציאל הוקטורי בכל המרחב שיוצר התיל.

ב. מצא את השדה המגנטי בנקודה מעל אמצע התיל.



**(3) סליל אינסופי**

נתון סליל אינסופי עם צפיפות ליפופים ליחידת אורך  $n$  ורדיוס  $a$ . מצא את הפוטנציאל הוקטורי בכל המרחב אם בסליל זרם  $I$ .

**(4) גליל אינסופי**

מצא את הפוטנציאל הוקטורי שיוצר גליל אינסופי ברדיוס  $a$  הנושא זרם  $I$ , אם צפיפות הזרם בגליל אחידה.

**(5) מישור עבה עם צפיפות זרם אחידה**

מישור אינסופי נמצא במקביל למישור  $x - y$

כאשר המישור  $x - y$  נמצא במרכזו.

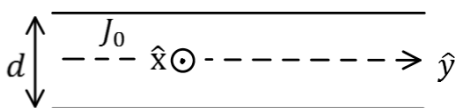
במישור צפיפות זרם אחידה  $\vec{J} = J_0\hat{x}$ .

עובי המישור הוא  $d$ .

א. מצא את כיוון הפוטנציאל הוקטורי

במרחב.

ב. מצא את פונקציית הפוטנציאל הוקטורי בכל המרחב.



**תשובות סופיות:**

$$\vec{J} = \frac{C}{r^2} \hat{\phi} \quad (1)$$

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I L \cdot \hat{y}}{4\pi x \sqrt{\left(\frac{L}{2}\right)^2 + x^2}} \quad \text{ב.} \quad \vec{A}(\vec{r}) = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \ln \left( \frac{z + \frac{L}{2} + \sqrt{\left(z + \frac{L}{2}\right)^2 + x^2 + y^2}}{z - \frac{L}{2} + \sqrt{\left(z - \frac{L}{2}\right)^2 + x^2 + y^2}} \right) \hat{z} \quad \text{א.} \quad (2)$$

$$\vec{A} = \frac{\mu_0 I \ln}{2} \hat{\phi} \quad r < a, \quad \vec{A} = \frac{\mu_0 I \ln a^2}{2r} \hat{\phi} \quad r > a \quad (3)$$

$$\vec{A} = \frac{\mu_0 J_0}{2} \cdot \frac{r^2}{2} \hat{z} \quad r < a, \quad \vec{A} = \frac{\mu_0 J_0}{2} \left( \frac{a^2}{2} + a^2 \ln \frac{r}{a} \right) \hat{z} \quad r > a \quad (4)$$

$$A(z) = \begin{cases} -\mu_0 J \frac{z^2}{2} \hat{x} & |z| < \frac{d}{2} \\ -\frac{\mu_0 J d}{2} \left( z - \frac{d}{4} \right) \hat{x} & |z| > \frac{d}{2} \end{cases} \quad \text{ב.} \quad \vec{A} = A(z) \hat{x}, \quad \vec{B} = B(z) \hat{y} \quad \text{א.} \quad (5)$$

# פיזיקה קלאסית 2 (לפיזיקאים)

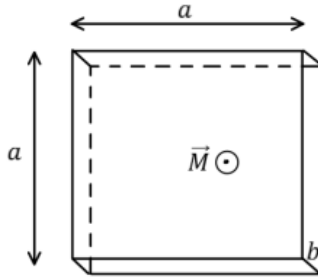
פרק 25 - חומרים מגנטים

תוכן העניינים

1. הרצאות ותרגילים ..... 113

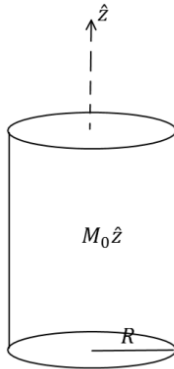
## הרצאות ותרגילים:

### שאלות:



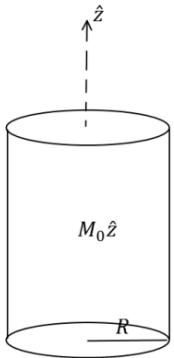
#### (1) תיבה דקה ממוגנטת

נתונה תיבה בעלת אורך ורוחב  $a$  ועובי  $b \ll a$ .  
 לתיבה מגנטיזציה "קפואה" (התיבה ממוגנטת כאשר היא לא בתוך שדה מגנטי חיצוני) ואחידה  $\vec{M}$ .  
 כיוון המגנטיזציה בכיוון מקביל לצלע  $b$ .  
 א. מצא את השדה המגנטי במרכז התיבה.  
 ב. מצא את השדה המגנטי רחוק מאוד מהתיבה.



#### (2) גליל אינסופי ממוגנט

גליל אינסופי ברדיוס  $R$  מקוטב בצורה אחידה  $\vec{M} = M_0 \hat{z}$ .  
 מצא את השדה המגנטי בכל המרחב.



#### (3) גליל ממוגנט נוסף

גליל אינסופי ברדיוס  $R$  מקוטב בצורה  $\vec{M} = Ar\hat{\phi}$ .  
 כאשר  $A$  קבוע כלשהו ו- $r$  הוא המרחק ממרכז הגליל.  
 א. מצא את הזרמים הקשורים בגליל ומצא את השדה המגנטי במרחב.  
 ב. מצא את השדה המגנטי בכל המרחב ע"י שימוש בוקטור השדה  $H$  וללא שימוש בזרמים קשורים.

#### (4) סליל עם ליבה מגנטית

נתון סליל אינסופי עם צפיפות ליפופים ליחידת אורך  $n$ .  
 מכניסים לסליל ליבה מגנטית בעל סוספטביליות נתונה  $\chi_m$  הממלא את כל הנפח הכלוא בסליל.  
 מצא את השדה המגנטי בתוך הסליל אם בסליל זורם זרם  $I$ .

**(5) אנרגיה להאט גליל מסתובב**

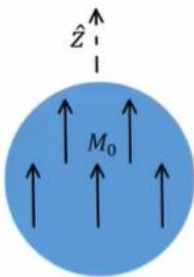
- גליל אינסופי ברדיוס  $R$  בעל מקדם פראמביליות יחסי  $\mu_r = \alpha r$  טעון בצפיפות מטען אחידה ליח' נפח  $\rho$ .  
 הגליל מסתובב סביב ציר הסימטריה שלו במהירות זוויתית  $\omega$ .  
 א. מהו השדה המגנטי בתוך הגליל?  
 ב. כמה אנרגיה ליחידת אורך יש להשקיע על מנת להאט את המהירות הזוויתית של הגליל לרבע ממהירותו הנוכחית?

**(6) חומר ממלא חצי מרחב**

- חומר בעל צפיפות אטומים של  $n = 2 \cdot 10^{28} \left[ \frac{1}{m^3} \right]$  נמצא תחת שדה מגנטי חיצוני אחיד. החומר מתמגנט כך שבכל אטום מתקבל בממוצע דיפול מגנטי של  $\vec{m} = 1.2 \cdot 10^{-24} [A \cdot m^2] \hat{x}$ .  
 השדה המגנטי הנמדד בתוך החומר הוא:  $\vec{B} = 0.04 [T] \hat{x}$ .  
 א. מצא את המגנטיזציה  $\vec{M}$  בחומר, את הסוספטביליות המגנטית  $\chi_m$  ואת הפאראמביליות  $\mu$  של החומר.  
 ב. הנח שהחומר ממלא את חצי המרחב  $x < 0$  וחצי המרחב השני הוא ריק. מהם הזרמים המושרים במרחב?  
 ג. מצא את השדה החיצוני  $\vec{H}$  אשר יצר את המגנטיזציה.  
 ד. מה יהיה השדה המגנטי  $\vec{B}$  בריק, סמוך מאוד לגבול בין הריק לחומר? כיצד תשתנה התוצאה אם החומר ממלא את חצי המרחב  $y < 0$ ?

**(7) כדור ממוגנט**

- כדור ברדיוס  $R$  ממוגנט במגנטיזציה קבועה  $\vec{M} = M_0 \hat{z}$ .  
 מצא את הפוטנציאל המגנטי בכל המרחב.



## תשובות סופיות:

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \left( \frac{(3Ma^2 b \hat{z} \cdot \hat{r}) \hat{r} - Ma^2 b \hat{z}}{r^3} \right) \quad \text{ב.} \quad \text{א. ראה סרטון} \quad (1)$$

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{M} \quad (2)$$

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{M} \quad \text{ב.} \quad \vec{B} = \mu_0 \vec{M} \quad r < R, \quad \vec{J}_b = 2A \hat{z}, \quad \vec{k}_b = -AR \hat{z} \quad \text{א.} \quad (3)$$

$$B = 0 \quad r > R$$

$$\vec{B} = \mu_0 (1 + X_m) n I \hat{z} \quad (4)$$

$$\vec{B} = \mu_0 \alpha r \rho \omega \frac{R^2 - r^2}{2} \hat{z} \quad r < R, \quad \vec{B} = 0 \quad r > R \quad \text{א.} \quad (5)$$

$$\Delta \left( \frac{U_B}{1} \right) = \mu_0 \alpha \rho^2 \cdot \pi R^7 \omega^2 \cdot \frac{1}{56} (-1) \quad \text{ב.}$$

$$\vec{J}_b = 0, \quad \vec{k} = 0 \quad \text{ב.} \quad \vec{M} = 2.4 \cdot 10^4 \left( \frac{A}{m} \right) \hat{x}, \quad X_m \approx 2.07, \quad \mu = 3.86 \cdot 10^{-6} \left( \frac{T \cdot m}{A} \right) \quad \text{א.} \quad (6)$$

$$B_x(0^+) = 0.04T, \quad \vec{B} \approx 0.01T \hat{x} \quad \text{ד.} \quad H = \begin{cases} 1.16 \cdot 10^4 \left( \frac{A}{m} \right) \hat{x} & x < 0 \\ 3.56 \cdot 10^4 \left( \frac{A}{m} \right) \hat{x} & x > 0 \end{cases} \quad \text{ג.}$$

$$\phi_{m_1} = \frac{M_0}{3} r \cos \varphi, \quad \phi_{m_2} = \frac{M_0 R^3}{3} \cos \varphi \quad (7)$$

# פיזיקה קלאסית 2 (לפיזיקאים)

פרק 26 - מעגלי זרם חילופין

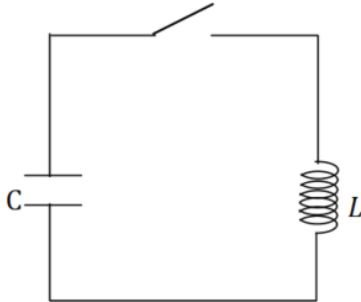
תוכן העניינים

1. למחוק מעגלי זרם ישר ..... (ללא ספר)
2. מעגלי זרם חילופין ..... 116
3. למחוק -פאזורים ועכבות ..... (ללא ספר)
4. למחוק מעגלים אינסופיים ..... (ללא ספר)

## מעגלי זרם חילופין:

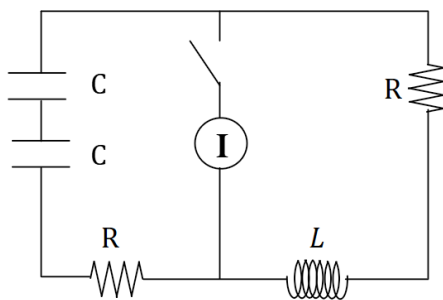
### שאלות:

#### LC (1)



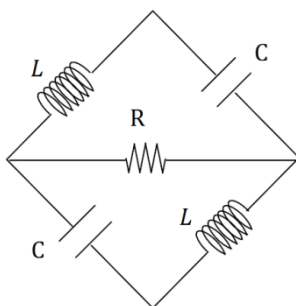
- במעגל הבא  $C = 100\mu\text{F}$  ו- $L = 40\text{mH}$ .  
 בהתחלה המתג פתוח והקבל טעון ב- $12\mu\text{C}$ .
- מה הזרם במעגל ברגע סגירת המתג?
  - מהי התדירות וזמן המחזור של המעגל?
  - מתי הזרם מקסימאלי?
  - מהי האנרגיה בסליל כתלות בזמן?
- מהי האנרגיה בקבל כתלות בזמן?  
 ומהי האנרגיה הכוללת כתלות בזמן?

#### RLC עם מקור זרם (2)



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

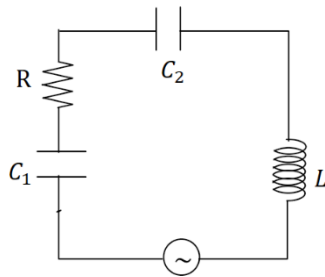
#### מעגל RLC יהלום (3)



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

**(4) מעגל טורי זרם חילופין**

במעגל הבא נתון:



$$V_s(t) = 200 \cos(2000t) \text{ V}, \quad I(t) = 4 \cos(2000t + \varphi) \text{ A}$$

$$C_1 = 100 \mu\text{F}, \quad L = 10 \text{ mH}, \quad R = 10 \Omega$$

א. מצא את הקיבול  $C_2$ .

ב. מצא את הפאזה של הזרם.

ג. מצא את ההספק הממוצע של המקור.

**(5) מקור, סליל ונגד בטור עם קבל ונגד**

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

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

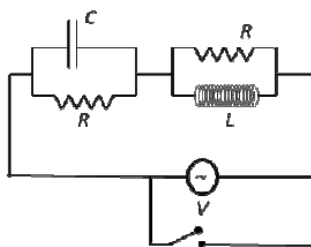
א. מהי העכבה הכוללת של המעגל?

ב. עבור איזה תדר של המקור אין הפרש מופע בין הזרם למתח?

ג. מקצרים את המקור, ונתון המטען ההתחלתי על הקבל  $Q_0$ .

i. עבור אילו ערכים של  $R$  תהיה דעיכה ללא תנודות?

ii. מה הזמן האופייני לאיבוד אנרגיה?



**(6) שני מקורות סליל וקבל במקביל לנגד**

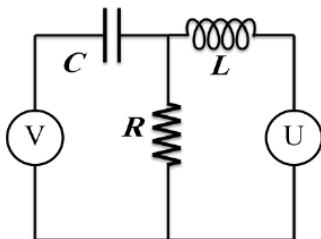
במעגל הבא  $U$  ו- $V$  הם שני מקורות מתח חילופין.

נתון:  $R, L, C$ .

$$U(t) = U_0 \cos(\omega t), \quad V(t) = V_0 \cos(\omega t)$$

א. מצא את הזרם בנגד במצב העמיד.

ב. מה התנאי לכך שהזרם יתאפס?



**(7) מעגל זרם חילופין**

במעגל הבא נתון כי מתח המקור הוא:

$$v(t) = 50 \cos(1000t) \text{ V}$$

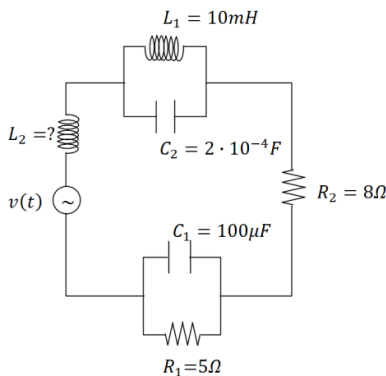
כמו כן הזרם העובר בנגד  $R_2$  הוא:

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

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

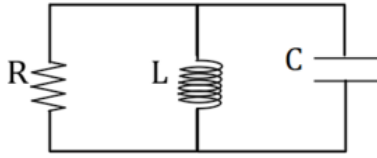
ב. מצא את הזרם בקבל  $C_1$  ב- $t = 2$ .

ג. חשב את ההספק הממוצע של מקור המתח.



### 8) סליל נגד וקבל בטור

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.

## תשובות סופיות:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$U_F = \frac{Q^2}{4C}, I_1 = q_1 = -\frac{1}{2} A \omega \sin(\omega t + \varphi) = I_2 \quad \text{ג.}$$

$$80\text{W} \quad \text{ג.} \quad \varphi = 78.47 \quad \text{ב.} \quad 6.76 \mu\text{F} \quad \text{א.} \quad (4)$$

$$Z = \left( \frac{\omega^2 L^2}{R^2 + \omega^2 L^2} + \frac{1}{(\omega RC)^2 + 1} \right) R + i \left( \frac{\omega L}{R^2 + \omega^2 L^2} - \frac{\omega C}{(\omega RC)^2 + 1} \right) R^2 \quad \text{א.} \quad (5)$$

$$\Gamma = \frac{2}{RC}, \frac{\Gamma}{2} > \omega_0, \omega_0^2 = \frac{1}{LC}, \frac{1}{R} > \sqrt{\frac{C}{L}} \quad \text{א.ג.} \quad \omega = \sqrt{\frac{1}{LC}}, Z = \frac{2R}{1 + \frac{R^2 C}{L}}$$

$$\text{ג.ii.} \quad \tau = \frac{RC}{2}$$

$$U_0 = V_0 \omega^2 LC \quad \text{ב.} \quad V_R = V_{R_{\max}} \sin(\omega t + \varphi_R) + A e^{-\Gamma t} \cos(\tilde{\omega} t + \varphi) \quad \text{א.} \quad (6)$$

$$43.5\text{W} \quad \text{ג.} \quad I_{C_1} = 9.38\text{A} \quad \text{ב.} \quad I_0 = 2.46\text{A}, L_2 = 40.3 \cdot 10^3 \text{H} \quad \text{א.} \quad (7)$$

(8) שאלת הוכחה.

# פיזיקה קלאסית 2 (לפיזיקאים)

פרק 27 - משוואות מקסוואל

תוכן העניינים

1. המשוואות והמעברים ..... (ללא ספר)

# פיזיקה קלאסית 2 (לפיזיקאים)

פרק 28 - גלים אלקטרומגנטיים

תוכן העניינים

1. הסברים ותרגילים ..... 120

## הסברים ותרגילים:

### שאלות:

#### (1) תרגיל 1

נתון השדה המגנטי:  $\vec{B} = B_0 \cos(Ax - 2Ay - \omega t) \hat{z}$ .

- מצא את וקטור הגל של השדה?
- הבא את התדירות באמצעות הפרמטר  $A$ .
- מצא את השדה החשמלי?
- מה הכוח הפועל על מטען  $Q$  הנמצא בראשית עם מהירות  $\vec{v} = v_0 \hat{x}$  ב- $t = 0$ ?
- מצא את הוקטור פויטינג?

#### (2) מצא שדה מגנטי, תרגיל ונוסחה נוספת

השדה החשמלי בגל אלקטרו מגנטי נתון לפי:  $\vec{E} = E_0 (1, 1, 2) e^{i(2x - z - \omega t)}$ . מצא את השדה המגנטי.

#### (3) גל עומד

משוואת הגלים בצורה כללית היא:  $\nabla^2 \phi = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2}$  כאשר  $\phi$  היא פונקציית הגל

במרחב ו- $v$  היא מהירות הגל  $\left( v = \frac{\omega}{k} \right)$ . במקרה של גלים אלקטרו מגנטיים  $\phi$

תהיה הפונקציה של השדה החשמלי או המגנטי,  $v = c$ .

א. הראה שהפונקציה  $\phi(x, t) = A \cos(kx) \sin(\omega t)$  מקיימת את משוואת

הגלים ולכן היא פתרון אפשרי למשוואה.

ב. פתרון דלמבר למשוואת הגלים אומר שכל פתרון צריך להיות

מהצורה  $f(x - vt) + g(x + vt)$ , כאשר  $f$  ו- $g$  הם פונקציות כלשהן.

הראה שהפונקציה מסעיף א' היא גם פיתרון מהצורה הכללית של

הפתרון של דלמבר.

רמז: השתמש בזהויות טריגונומטריות.

## תשובות סופיות:

$$\omega = C \cdot A \cdot \sqrt{S} \quad \text{ב.} \quad \vec{k} = (A, -2A, 0) \quad \text{א.} \quad (1)$$

$$\vec{E} = +C^2 2AB_0 \cos(Ax - 2Ay - \omega t) \cdot \frac{1}{+\omega} \hat{x} + C^2 2AB_0 \cos(Ax - 2Ay - \omega t) \cdot \frac{1}{+\omega} \hat{y} \quad \text{ג.}$$

$$\vec{S} \cdot \vec{E} = 0 \quad \text{ה.} \quad \vec{F} = Q \left( \frac{C^2 AB_0}{\omega} (2\hat{x} + \hat{y}) + V_0 B_0 (-\hat{y}) \right) \quad \text{ד.}$$

$$\vec{B} = \frac{E_0}{\sqrt{5}c} (1, -5, 2) e^{i(2x - z - \omega t)} \quad (2)$$

(3) שאלת הוכחה.

# פיזיקה קלאסית 2 (לפיזיקאים)

פרק 29 - וקטור פויינטינג והאנרגיה האגורה בשדות

תוכן העניינים

1. הרצאות ותרגילים ..... 122

## הרצאות ותרגילים:

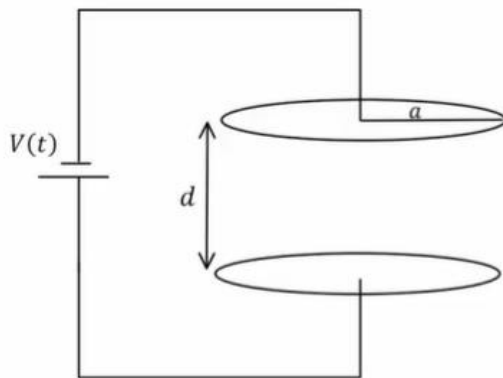
### שאלות:

#### 1) קבל לוחות עם מתח ליניארי בזמן

קבל לוחות מורכב משני לוחות מעגליים ברדיוס  $a$  הנמצאים במרחק  $d \ll a$  זה מזה.

הקבל מחובר למקור מתח התלוי לינארית בזמן  $V(t) = A \cdot t$ , כאשר  $A$  קבוע נתון.

- מצא את השדה החשמלי בקבל כתלות בזמן.
- מצא את השדה המגנטי בתוך הקבל ומחוץ לו.
- מצא את האנרגיה האגורה בתוך משטח סגור העוטף את הקבל.
- מצא את הוקטור פויינטינג על השפה של המשטח מסעיף ג'.
- חשב את השטף של הוקטור פויינטינג על המשטח והראה כי הוא שווה למינוס השינוי בזמן של האנרגיה מסעיף ג'.



### תשובות סופיות:

$$\vec{E} = \frac{A \cdot t}{d} \hat{z} \quad \text{א. (1)}$$

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 \varepsilon_0 A r}{2d} \hat{\theta} \quad r < a, \quad \vec{B} = \frac{\mu_0 \varepsilon_0 A a^2}{2rd} \hat{\theta} \quad r \geq a \quad \text{ב.}$$

$$U = \frac{\varepsilon_0 A^2 \pi a^2}{2d} \left( t^2 + \frac{\mu_0 \varepsilon_0 a^2}{2} \right) \quad \text{ג.}$$

$$\vec{S} = \frac{-A^2 \varepsilon_0 t a}{d} \pi a \quad \text{ד. ה. הוכחה.}$$

# פיזיקה קלאסית 2 (לפיזיקאים)

פרק 30 - תרגילים ברמת מבחן

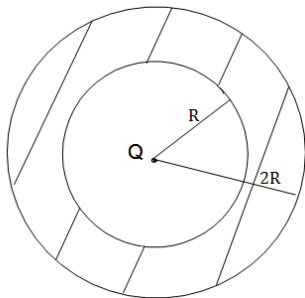
תוכן העניינים

1. תרגילים.....123

## תרגילים:

### שאלות:

#### (1) מטען במרכז קליפה



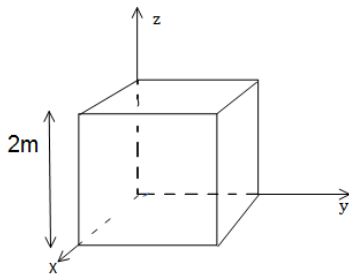
מטען נקודתי  $Q$  נמצא במרכזה של קליפה כדורית עבה. רדיוס הקליפה הפנימי הוא  $R$  ורדיוסה החיצוני הוא  $2R$ . הקליפה מוליכה ואינה טעונה.

א. מצא את הפרש הפוטנציאלים בין הנקודה

הנמצאת ב-  $r = \frac{R}{3}$  לבין הנקודה הנמצאת ב-  $r = 3R$ .

ב. חזור על סעיף א' עבור המקרה בו הקליפה טעונה במטען כולל  $2Q$ .

#### (2) מטען אנרגיה ופוטנציאל בקובייה



נתון שדה במרחב:  $\vec{E} = 2y\hat{x} + 3y\hat{y}$ .

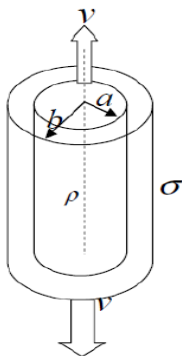
קובייה בעלת צלע של  $2m$  נמצאת ברביע הראשון כך שאחד מקדקודיה נמצא על הראשית (ראה ציור).

א. חשב את סך המטען הכלוא בתוך קובייה.

ב. מהי האנרגיה האלקטרוסטטית בתוך הקובייה?

ג. מצא מהו הפרש הפוטנציאלים בין ראשית הצירים והקדקוד הנמצא בנקודה  $(0, 2, 0)$ .

#### (3) גליל וקליפה טעונים ונעים



במערכת הבאה ישנו גליל מבודד מלא ואינסופי ברדיוס  $a$ . מסביב לגליל ישנה קליפה גלילית מבודדת דקה ברדיוס  $b$  (לגליל ולקליפה ציר מרכזי משותף).

צפיפות המטען ליחידת נפח בתוך הגליל היא  $\rho$  והיא אחידה, וצפיפות המטען ליחידת שטח בקליפה היא  $\sigma$  והיא אחידה גם כן.

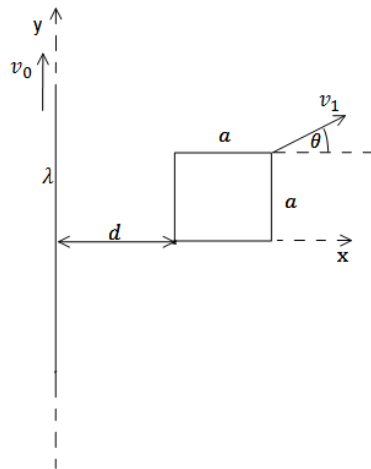
א. מצא מהו היחס  $\frac{\rho}{\sigma}$  כך שהשדה מחוץ לקליפה יתאפס.

ב. מהו השדה החשמלי בכל המרחב?

ג. מהו הפוטנציאל החשמלי בכל המרחב ומהו הפרש הפוטנציאל בין הגליל לקליפה?

כעת מזיזים את הגליל במהירות קבועה  $v$  כלפי מעלה ואת הקליפה באותה המהירות כלפי מטה.

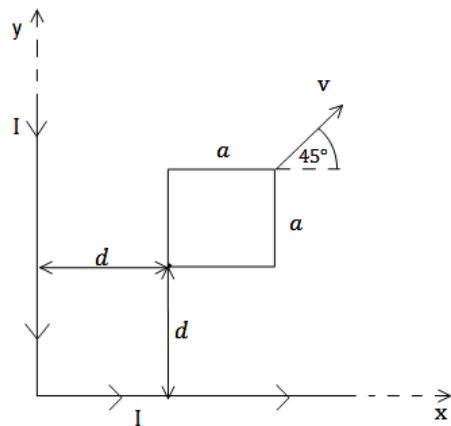
ד. מהו השדה המגנטי בכל המרחב?



**(4) מסגרת נעה באלכסון ליד תיל נע**

תיל אינסופי נמצא לאורך ציר ה- $y$ . התיל טעון בצפיפות מטען אחידה ליחידת אורך  $\lambda$  ונע בכיוון ציר ה- $y$  במהירות קבועה  $v_0$ . מסגרת מלבנית בעלת צלע  $a$  נמצאת ב- $t = 0$  במישור  $x-y$  כך שהפינה השמאלית שלה מרוחקת מרחק  $d$  מהתיל (ראה סרטוט). התנגדות המסגרת היא  $R$ . המסגרת נעה במהירות קבועה  $v_1$  ובזווית טטה ביחס לציר ה- $x$ .

- א. מצא את הזרם במסגרת, גודל וכיוון.
- ב. מהו הכוח הפועל על המסגרת על מנת למשוך אותה במהירות קבועה?
- ג. מהו ההספק של הכוח ומהו ההספק שהולך לאיבוד כחום בנגד?

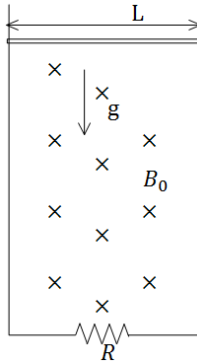


**(5) מסגרת נעה בין שני תילים**

תיל אינסופי מכופף בזווית של  $90^\circ$  כך שחלק אחד של התיל נמצא על החלק החיובי של ציר ה- $x$  והחלק השני על החלק החיובי של ציר ה- $y$  (ראה שרטוט). בתיל זרם זרם  $I_0$  קבוע, נגד השעון. מסגרת מלבנית בעלת צלע  $a$  נמצאת ב- $t = 0$  במישור  $x-y$  כך שהפינה השמאלית התחתונה שלה מרוחקת מרחק  $d$  מכל חלק של התיל (ראה סרטוט). התנגדות המסגרת היא  $R$ . המסגרת נעה במהירות קבועה  $v$  ובזווית של  $45^\circ$  ביחס לציר ה- $x$ .

- א. מצא את הזרם במסגרת, גודל וכיוון.
- ב. מהו הכוח הפועל על המסגרת על מנת למשוך אותה במהירות קבועה?
- ג. מהו ההספק של הכוח ומהו ההספק שהולך לאיבוד כחום בנגד?

**(6) מוט נופל מחובר למסילה**



מוט מוליך מונח על מסילה אנכית ונופל בהשפעת כוח הכובד. במרחב קיים שדה מגנטי  $B_0$  לתוך הדף. רוחב המסילה הוא  $L$  ומסת המוט היא  $M$  התנגדות המסילה קבועה ושווה ל- $R$ .

א. מצא את הכא"מ במעגל כתלות במהירות המוט  $v$ .

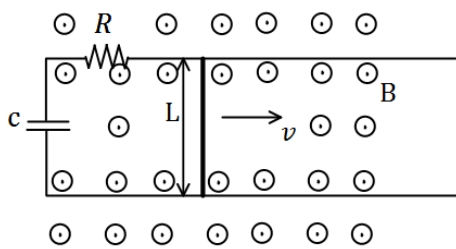
ב. מצא את כיוון השדה המושרה ואת כיוון הזרם שנוצר במעגל.

ג. מצא את הכוח המגנטי הפועל על המוט (עדיין כתלות במהירות).

ד. רשום משוואת כוחות על המוט. מהי המהירות הסופית של המוט?

ה. מצא את המהירות והזרם כפונקציה של הזמן.

**(7) פארדי עם קבל ונגד ביחד**



מוט מוליך באורך  $L$  נע על גבי מסילה מוליכה במהירות קבועה בזמן  $v$ . למסילה מחוברים נגד בעל התנגדות  $R$  וקבל בעל קיבול  $C$ . בכל המרחב קיים שדה מגנטי אחיד  $B$  החוצה מהדף.

א. מצא את הזרם במעגל גודל וכיוון (כתלות בזמן).

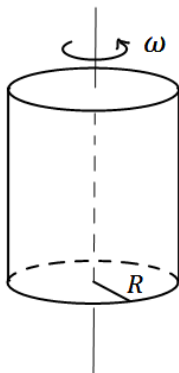
ב. מה הכוח בו צריך למשוך את המוט על מנת שישאר במהירות קבועה?

ג. מצא מהו ההספק של הכוח הנ"ל (כתלות בזמן).

ד. מצא מהו ההספק בנגד ובקבל (כתלות בזמן).

ה. הראה כי ההספק של הכוח החיצוני שווה להספק של הקבל והנגד. הסבר מדוע ההספקים שווים.

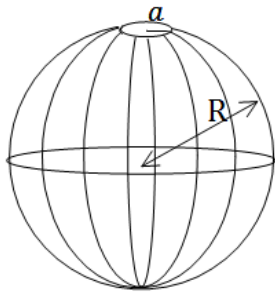
**(8) גליל טעון מסתובב**



קליפה גלילית דקה ואינסופית בעלת רדיוס  $R$  טעונה בצפיפות מטען ליחידת שטח  $\sigma$ . הקליפה מסתובבת במהירות זוויתית  $\omega$  סביב ציר הסימטריה שלה.

א. מצא את השדה המגנטי בכל המרחב.

ב. מצא את השדה המגנטי בכל המרחב אם במקום הקליפה היה גליל מלא עם צפיפות מטען אחידה ליחידת נפח  $\rho$ .



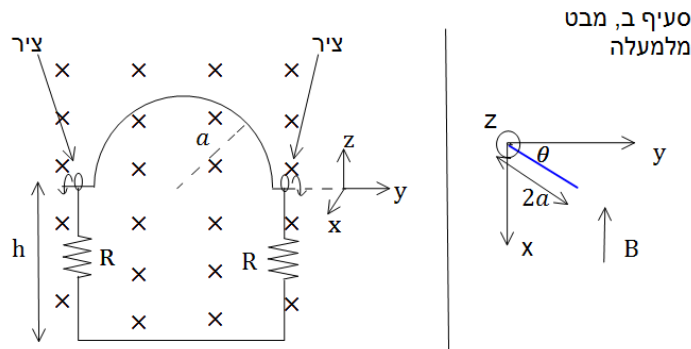
**(9) חור בקליפה כדורית**

בקליפה כדורית ברדיוס  $R$  יש מטען כולל  $Q$  המפולג בצורה אחידה על הקליפה. בחלקה העליון של הקליפה ישנו חור ברדיוס  $a$  כך ש- $a \ll R$ .

- א. מצא את השדה טיפה מעל החור וטיפה מתחתיו.
- ב. מצא את השדה במרחק  $a$  מעל החור.
- ג. מצא את השדה והפוטנציאל במרכז הקליפה.

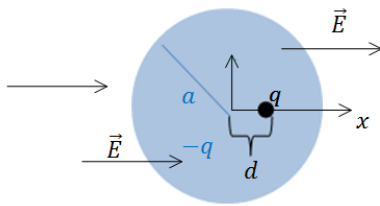
**(10) כבל מסתובב**

במערכת הבהאה ישנו כבל מוליך אידיאלי בצורת חצי מעגל ברדיוס  $a$ . בשתי הקצוות של חצי המעגל הכבל מחובר לצירים כך שניתן לסובבו סביבם (סביב ציר ה- $y$  בצירור). הצירים מחוברים למסגרת מלבנית בגובה  $h > a$ , המסגרת קבועה במקום. בכל צד של המסגרת קיים נגד  $R$ . במרחב קיים שדה מגנטי אחיד  $B$  לתוך הדף (במינוס  $X$ ). ב- $t=0$  הכבל נמצא במצב המתואר בצירור ומתחילים לסובבו סביב הצירים (ציר ה- $y$ ) במהירות זוויתית  $\omega$  (להמחשה, ברגע הראשון כל הנקודות במעגל מתקדמות אלינו).



- א. מהו הזרם בכבל?
- ב. נניח כי העמוד השמאלי של המסגרת נמצא בראשית וניתן לסובב את כל המערכת סביב עמוד זה. מצא את הזווית בה צריך לסובב את המסגרת כך שהזרם יקטן פי 2.
- ג. מצא את הזווית בה צריך לסובב את המסגרת כך שההספק יקטן פי 2.

**(11) אטום בשדה חשמלי**



מטען נקודתי  $q$  נמצא במרכז כדור הטעון במטען כולל  $-q$  וצפיפות אחידה ליחידת נפח.

רדיוס הכדור הוא  $a$  (מבנה זה הוא מודל פשוט לאטום כאשר המטען הנקודתי הוא סך המטען בגרעין והכדור הטעון מסמל "ענן אלקטרוני").

מכניסים את המערכת לשדה חשמלי אחיד  $\vec{E} = E_0 \hat{x}$ .

א. מצא את המרחק הנוצר בין מיקום המטען הנקודתי למרכז הכדור במצב שיווי משקל. (סמן את המרחק ב- $d$  והנח כי  $d \ll a$ ).

ב. חשב את העבודה הכוללת שמבצע השדה החשמלי על המערכת בזמן ההכנסה לשדה.

חלק לשני מקרים:

1 - כאשר השדה מופעל על המערכת וגדל מאפס עד ל- $E_0$  בצורה איטית.

2 - כאשר המערכת נכנסת בפתאומיות לשדה.

ג. חשב את השדה שיוצרת המערכת מחוץ לכדור לאורך ציר ה- $x$  לפי סופרפוזיציה של מטען נקודתי וכדור.

השתמש בקירוב ש- $d \ll a$  ופשט את הביטוי לסדר ראשון.

ד. השווה את התשובה שבסעיף הקודם לשדה של דיפול, מהו מומנט הדיפול היוצא מהשוואה זו (גודל וכיוון)?

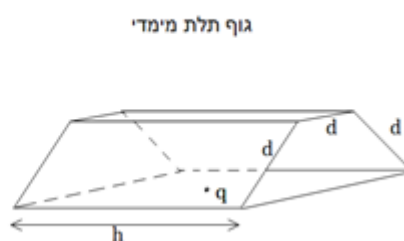
**(12) שטף דרך משושה**

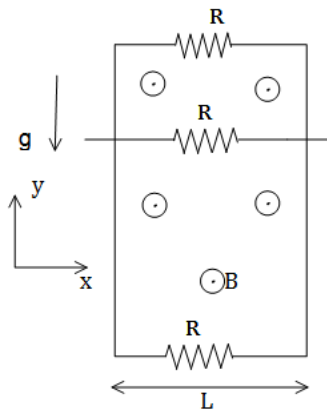
בציור ישנו גוף תלת מימדי שפאותיו בצדדים הם חצאי משושה שווה צלעות

עם אורך צלע  $d$ . המרחק בין הפאות הוא  $h$  וידוע ש- $h \gg d$ .

מטען נקודתי  $q$  נמצא במרכז הבסיס של הגוף.

מצא את השטף דרך אחת הפאות המלבניות (באורך  $h$  ורוחב  $d$ ).

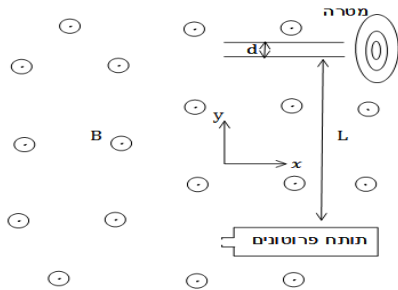




**13) נגד נופל במסגרת**

מסגרת מלבנית מוליכה, ארוכה מאוד ובעלת רוחב  $L$ , נמצאת בשדה הכובד. אורכה נמצא על ציר ה- $y$  ורוחבה על ציר ה- $x$ . בצלע העליונה ובצלע התחתונה של המסגרת קיימים נגדים עם התנגדות זהה  $R$ . מוט מוליך בעל התנגדות זהה  $R$  מחליק לאורך ציר ה- $y$  על המסגרת. מצא את המהירות הסופית של המוט אם במרחב קיים שדה מגנטי אחיד  $B$  בכיוון  $Z$  ונתונה מסת המוט.

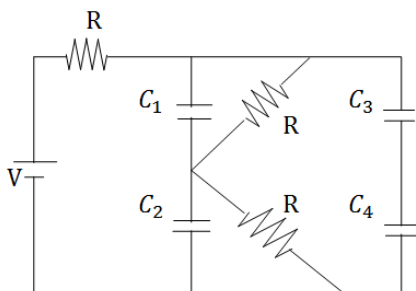
**14) תותח פרוטונים**



תותח פרוטונים יורה פרוטונים במהירויות שונות בכיוון מינוס ציר ה- $x$ . במרחק  $L$  מעל התותח נמצא קבל לוחות כאשר המרחק בין הלוחות הוא  $d \ll L$ . בסוף הקבל נמצאת מטרה. במרחב קיים שדה מגנטי  $B$  אחיד ובכיוון  $z$ . מצא את המתח שצריך להפעיל על הקבל על מנת שהפרוטונים יפגעו במרכז המטרה.

**15) אנרגיה של קבלים**

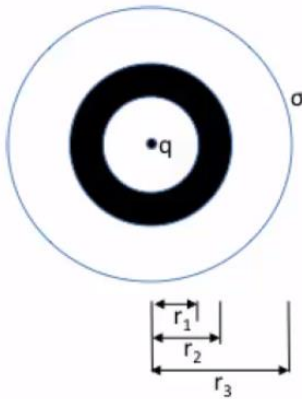
במעגל הבא נתון מתח המקור והתנגדות הנגדים (זהה לכל הנגדים).



- א. מצא את האנרגיה האגורה בקבלים במצב העמיד אם נתון ש-  
 $C_1 = C_2 = C_3 = C_4 = C$
- ב. כעת נתון שהגדילו את המרווח בין הלוחות של קבל  $C_3$  פי 2 ולקבל  $C_2$  הכניסו חומר דיאלקטרי בעל מקדם דיאלקטרי  $\epsilon_r$  הממלא את כל הנפח בתוך הקבל.  
מצא שוב את האנרגיה האגורה בקבלים.

**הערה:**

שאלות 16-18 לקוחות ממבחן של הנדסת חשמל באוניברסיטת תא, 2014 מועד א סמסטר א.



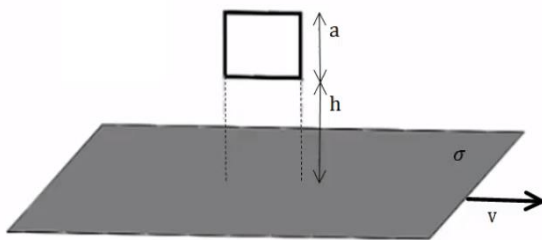
**16** נתונה המערכת הבאה, המתוארת בקואורדינטות כדוריות: בראשית הצירים נמצא מטען נקודתי  $q$ . בתחום הרדיאלי  $r_1 < r < r_2$  ישנה קליפה כדורית עבה, מוליכה ובלתי טעונה.

ברדיוס  $r_3$  (כאשר  $r_2 < r_3$ ) ישנה קליפה כדורית דקה, מבודדת וטעונה בצפיפות מטען שטחית  $\sigma$ .  
 א. מהו וקטור השדה החשמלי בכל המרחב?  
 ב. מהי פונקציית הפוטנציאל בכל המרחב? (קחו את הפוטנציאל להיות 0 ב- $x = \infty$ ).

ג. רשמו את מיקומיהן וגדליהן של כל צפיפויות המטען המשטחיות במערכת, פרט לזו שב- $r_3$ .

ד. מזיזים את המטען הנקודתי למיקום  $(\frac{r_1}{2}, 0, 0)$ . בכמה משתנה הפוטנציאל בנקודה  $(2r_3, 0, 0)$ ?

**17** במישור  $xy$  נמצא משטח אינסופי דק, הטעון בצפיפות מטען משטחית אחידה  $\sigma$ . המשטח נע במהירות  $\beta t \hat{x}$  כאשר  $\beta$  קבוע. בגובה  $h$  מעל המשטח, במישור  $xz$ , נמצאת לולאה ריבועית נייחת בעלת צלע  $a$  (ראו איור). ענו על כל הסעיפים כפונקציה של הזמן.

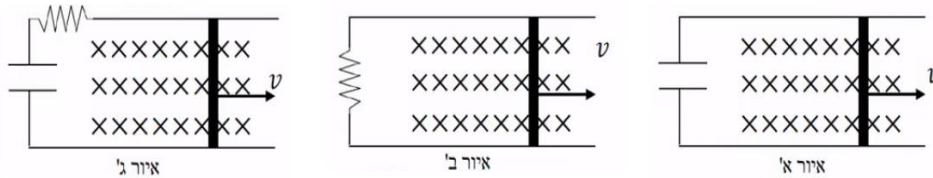


א. מהי צפיפות הזרם הקווית הנובעת מתנועת המשטח?  
 ב. מהו השדה המגנטי בכל המרחב?  
 ג. מהו שטף השדה המגנטי דרך הלולאה?

ד. נתון שלמסגרת התנגדות  $R$ .

מהו גודל הזרם במסגרת ומהו כיוונו (ציירו את הכיוון לפי האיור)?

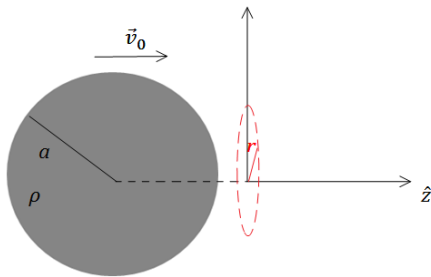
- 18) קבל שקיבולו C מחובר לשני מוטות חצי אינסופיים וחסרי התנגדות. מוט שלישי, בעל אורך H וחסר התנגדות, נוגע בקצותיו במוטות החצי אינסופיים ומתרחק מהקבל במהירות קבועה v (ראו איור א'). באזור המוט הנע פועל שדה מגנטי  $B_0$  הניצב למישור המעגל (השדה נכנס לדף). שדה זה אינו קיים באזור הקבל. הזניחו את התנגדות התילים ואת השדה המגנטי שיוצא הזרם המושרה.



- א. מהו הכא"מ המושרה במעגל?  
 ב. מהו המטען על הקבל?  
 ג. מחליפים את הקבל בנגד שהתנגדותו R (ראו איור ב'). מהו הזרם במעגל? (גודל וכיוון – ציינו את הכיוון באופן ברור).  
 ד. מחזירים את הקבל למעגל, כך שהוא מחובר בטור עם הנגד (ראו איור ג'). כתבו את משוואת המתחים של המעגל ומצאו את הזרם כפונקציה של הזמן, כאשר נתון שהקבל אינו טעון בזמן  $t = 0$ .

19) לולאה דמיונית בתוך כדור טעון נע

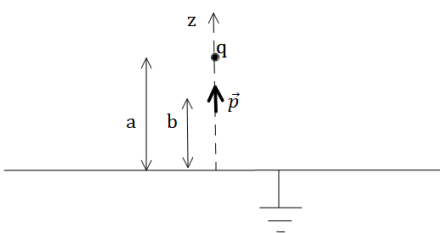
כדור ברדיוס a טעון בצפיפות מטען אחידה ליחידת נפח  $\rho$ . מרכז הכדור נמצא על ציר ה-z ונתון כי הכדור נע במהירות קבועה  $\vec{v} = v_0 \hat{z}$ . טבעת דימיונית ברדיוס  $r < a$  נמצאת על מישור x-y ומרכזה בראשית הצירים. פתור את סעיפי השאלה רק עבור הרגע בו מרכז הכדור נמצא על ראשית הצירים (הכדור עדיין נע).



- א. מה השדה החשמלי במרחב?  
 ב. מהו זרם ההעתקה העובר דרך הטבעת?  
 ג. מהו הזרם האמיתי העובר דרך הטבעת?  
 ד. מצא את השדה המגנטי על נקודה בטבעת.

20) מטען נקודתי ודיפול מעל מישור

מטען נקודתי q נמצא על ציר ה-z במרחק a מהראשית. דיפול חשמלי  $\vec{p} = (0, 0, p)$  נמצא גם כן על ציר ה-z במרחק b מהראשית. לאורכו ורוחבו של מישור xy מונח מישור אינסופי מוארק.

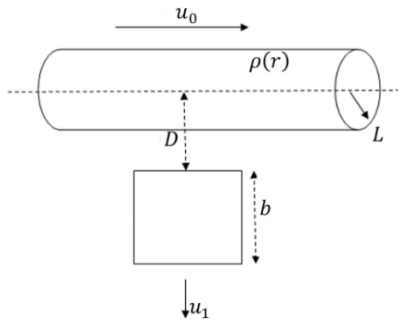


- א. מצא את הכוח הפועל על המטען q.  
 ב. מצא את העבודה הדרושה להביא את המטען מאינסוף לנקודה בה הוא נמצא.

**21 גליל טעון נע**

נתון גליל אינסופי בעל רדיוס  $L$  הטעון בצפיפות מטען נפחית  $\rho(r) = \rho_0 \left(\frac{r}{L}\right)^2$ . כאשר  $r$  מייצג את המרחק מציר הסימטריה של הגליל (ציר  $z$ ).

- א. קבל ביטוי לווקטור השדה החשמלי בכל המרחב.
- ב. קבל ביטוי לפוטנציאל החשמלי בכל המרחב. הניחו כי  $V(r=0) = V_0$ .
- ג. בשלב זה הגליל נע במהירות קבועה  $u_0$  בכיוון  $z$ . מה וקטור השדה המגנטי בכל המרחב?

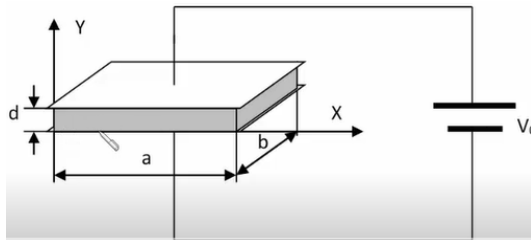


- ד. במרחק  $D$  ממרכז הגליל נמצאת לולאה ריבועית בעלת צלע  $b$  והתנגדות חשמלית  $R$ . נתון ש-  $D > L$  והלולאה וציר הגליל נמצאים באותו מישור, ושתיים מצלעות הלולאה ניצבות לציר הגליל. הלולאה מתחילה לנוע ב-  $t = 0$  במהירות קבועה  $u_1$  בכיוון הרדיאלי. מהן הזרם הזורם בלולאה ומה כוונת עבודת צפיפות מטען חיובית.

במידה ולא פתרת סעיף ג' אתה רשאי להניח זרם חשמלי  $I$  בגליל הנע.

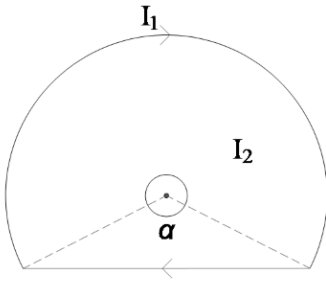
**22 קבל לוחות עם חומר תלוי במיקום**

נתון קבל לוחות עם שטח חתך מרובע  $a \times b$  (ראה תרשים). בין הלוחות שהמרחק ביניהם  $d$  מצוי חומר דיאלקטרי בעל דיאלקטריקות



יחסית  $\epsilon_r = 1 + \frac{y}{d}$  כאשר  $y$  הוא המרחק מהמשטח התחתון (מהאלקטרודה) אשר מיקומו במערכת הצירים מוגדר כ-  $y = 0$ . הלוחות מחוברים להפרש פוטנציאלים קבוע  $V_0$ .

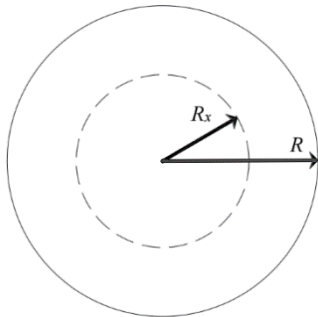
- א. פתח את הביטוי עבור קיבול הקבל.
- ב. מהו המטען וצפיפות המטען הנמצאת על כל לוח?
- ג. מהו השדה החשמלי בתוך החומר הדיאלקטרי כפונקציה של המיקום?
- ד. השתמש בצפיפות האנרגיה בתוך החומר הדיאלקטרי וחשב את האנרגיה האצורה בחצי התחתון של הקבל.



**(23) מומנט כוח של תיל העובר בתוך גלגל עם פנצ'ר**  
 בלולאה טבעתית ברדיוס R הוחלפה קשת בזווית  $\alpha$  במיתר ישר. בלולאה זורם זרם  $I_1$ . מוליך ישר אינסופי ניצב למישור הלולאה וחוצה אותו במרכזה של הטבעת. במוליך זורם זרם  $I_2$ . מהם הכוח ומומנט הכוח הפועלים על הלולאה?

**(24) חור בתוך כדור**

כדור שרדיוסו R טעון בצפיפות נתונה אשר שווה ל- $\rho(r) = Cr^3$ . ידוע כי המטען הכולל של הכדור שווה Q.

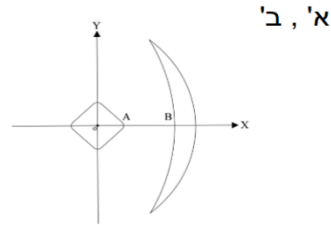
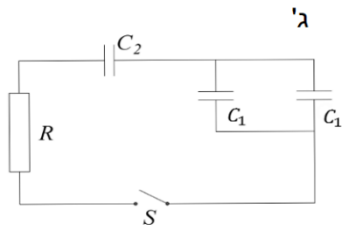


- א. מצא את הפרמטר C.
- ב. מהי עוצמת השדה החשמלי בכל המרחב?
- ג. מוציאים מהכדור ליבה כדורית שרדיוסה  $R_x$  אשר יוצר חלל פנימי אך שאר החומר עדיין טעון כמו קודם. הפרמטר  $R_x$  אינו ידוע. במצב החדש עוצמת השדה החשמלי בכל התחום  $r > R$  נחלשה פי 2.

מצא את עוצמת השדה החשמלי בתחום  $R_x \leq r \leq R$  (אפשר אך אין חובה למצוא את  $R_x$ ).

**(25) קבל לא סטנדרטי**

בתרשים שלפנינו מתואר קבל הבנוי משני גופים מוליכים שצורתם איננה סטנדרטית. הצירים x,y מוגדרים בשרטוט. נתונות קואורדינטות של הנקודות A , B :  $x_A = a, x_B = b$ . ידוע כי כאשר קבל זה טעון במטען q הפוטנציאל על ציר ה-x בין הנקודות A ו-B ניתן לפי הנוסחה  $\varphi = \gamma q(x^2 + ax + bx)$ .



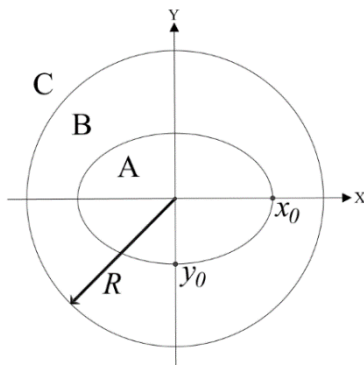
- א. מהו קיבולו של הקבל?
- ב. ממלאים את הרווח שבין שני גופי הקבל בחומר דיאלקטרי, בעקבות זאת השדה בתוך הקבל משתנה ווקטור השדה בנקודות של ציר ה-x נתון לפי הנוסחה הבאה:  $\vec{E} = -\frac{\gamma q}{3a} \cdot (ax + 2xy, x^2 + z^2, 2yz)$  מצא את קיבול הקבל במקרה זה.

ג. טוענים את הקבל של סעיף א' ונותנים לו להתפרק דרך נגד R. כעבור 7 שניות, לאחר תחילת הפריקה נתון כי עוצמת הזרם במעגל ירדה פי 100. בניסוי נוסף מחברים מעגל משלושה קבלים כפי שרטוט 2 מראה, המעגל כולל 2 קבלים של סעיף א' ( $C_1$ ) ועוד קבל של הסעיף ב' ( $C_2$ ). טוענים את הקבלים ונותנים להם להתפרק דרך אותו הנגד R. כמה זמן יעבור כעת מרגע סגירת המפסק ועד שהזרם יקטן פי 100.

**(26) מוליך לא סטנדרטי**

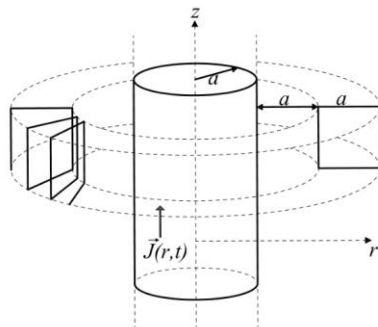
נתונה קליפה גלילית דקה שאינה מוליכה באורך אין סופי. בתוך הקליפה נמצא גוף נוסף, מוליך שאורכו גם אין סופי. באיור מוצג חתך של המערכת, נסמן ב-A את שטח חתך המוליך, ב-B את התחום בין המוליך לקליפה וב-C את התחום שמחוץ למערכת. R הוא רדיוס הקליפה הגלילית אשר טעונה בצפיפות מטען אחידה  $\sigma$ . מערכת הצירים נבחרה כך שציר z מתלכד עם ציר הסימטריה של הקליפה (שימו לב כי צורת החתך המוצגת באיור הינה להמחשה בלבד). נתונה נקודת החיתוך  $(x_0, 0, 0)$  של שפת המוליך עם ציר ה-x ראו איור.

ידוע גם השדה השקול של המערכת בתחום C: 
$$\vec{E}_C(x, y, z) = \frac{\sigma R(5x, y, 0)}{\epsilon_0(25x^2 + y^2)}$$



- א. מצאו את תרומתה של הקליפה הגלילית לוקטור השדה החשמלי בכל מקום במרחב. (כפונקציה של  $x$  ו- $y$ ).
- ב. קבלו ביטוי עבור וקטור השדה החשמלי בתחום A ובתחום B.
- ג. חשבו את הפרש הפוטנציאל  $\Delta\phi$  בין הנקודות  $(0, y_0, z_0)$  הנמצאת אף היא על שפת המוליך לבין הנקודה  $(R, 0, 0)$  שעל הקליפה הגלילית.

**(27) טורואיד מסביב לגליל עם זרם**

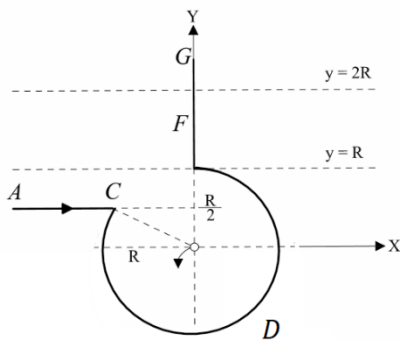


נתון גליל מוליך אינסופי שרדיוסו a הנושא את הזרם  $\vec{j}(r, t) = crt^2 \hat{z}$  הקבוע c חיובי. א. מצא את וקטור השדה המגנטי בסביבתו החיצונית ( $a < r$ ). מקיפים את הגליל בסליל סגור בעל כריכות שצורתן ריבוע שאורך צלעותיו a כנראה בשרטוט. בעלת חתך ריבועי כמתואר על ידי הקווים המנוקדים.

- הדופן הפנימית של הסליל מרוחקת מרחק  $a$  ממעטפת הגליל.  
 בנוסף נתון שהסליל הוא תייל בעל רדיוס חתך  $\frac{a}{100}$  והתנגדות סגולית  $\rho$ .  
 ב. חשבו את השטף המגנטי דרך כריכה בודדת בסליל.  
 ג. חשבו את הזרם המושרה בסליל כפונקציה של הזמן וציינו את כיוונו.

**(28) חישוב שדה של תיל מיוחד**

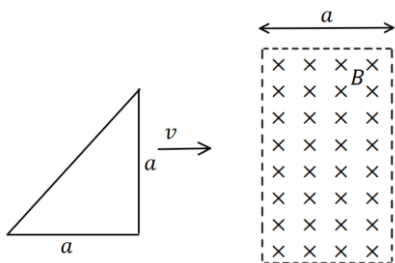
תיל ACDFG כולל חלק מעגלי שרדיוסו  $R$  ושני קטעים ישרים אינסופיים. המשך הקו AC חותך את רדיוס המעגל במרכזו (ראו בשרטוט). בתיל זרם  $I$ , כיוון הזרם מסומן בשרטוט.



- א. מהו גודלו וכיוונו של וקטור השדה המגנטי במרכז החלק המעגלי של התיל?  
 ב. חלקיק טעון עובר דרך מרכז החלק המעגלי של התיל מסלולו מתעקם עקב השפעת השדה המגנטי של התיל. צורת המסלול וכיוון התנועה נתונים בשרטוט. מהו סימן מטענו של החלקיק?  
 ג. בניסוי נוסף יוצרים שדה מגנטי לא אחיד בכל התחום  $R < y < 2R$ . חלק של התיל FG נמצא בתוך תחום זה (ראו בשרטוט). נתון וקטור השדה  $\vec{B}(0,0, ay^2)$ , כאשר הקבוע  $a$  נתון. מהו הכוח המגנטי ששדה זה מפעיל על התיל?

**(29) משולש נכנס הפוך לשדה מגנטי**

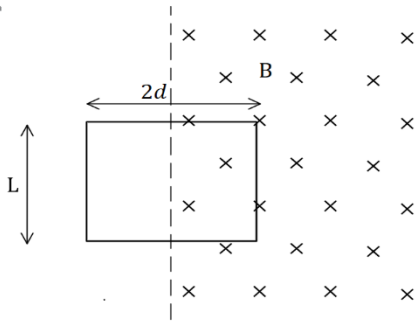
משולש מתכתי נכנס לאזור ברוחב  $a$  בו קיים שדה מגנטי אחיד  $B$ . מהירות המשולש קבועה בזמן ונתונה כ- $v$ . נתון כי הצלע הימנית של המשולש נכנסת לשדה ב- $t = 0$ . המשולש שווה שוקיים ואורך כל שוק הוא  $a$ . התנגדות המשולש היא  $R$ .



- א. חשב את הכא"מ במסגרת כתלות בזמן וצייר גרף  $\varepsilon(t)$ .  
 ב. מהו הספק איבוד האנרגיה?  
 ג. חשב את הכוח הדרוש כדי שהמסגרת תנועה במהירות קבועה.

**30 מסגרת נעה בשדה שקטן**

מסגרת מלבנית בעלת אורך  $2d$  ורוחב  $L$  מונחת כך שרק חציה הימני נמצא בתוך שדה מגנטי (ראה איור). כיוון השדה הוא לתוך הדף וגודלו משתנה באופן הבא: ב-  $0 < t < t_0$  גודל השדה קבוע ושווה ל- $B$ , ב-  $t_0 < t < 2t_0$  גודל השדה יורד בקצב קבוע עד שהוא מגיע לערך 0 בזמן  $2t_0$ . לאחר מכן גודל השדה נשאר אפס. התנגדות המסגרת היא  $R$ .



א. חשב את הכא"מ המושרה מרגע  $t = 0$  בהנחה שהמסגרת מקובעת במקומה.

ב. שרטט את הזרם כתלות בזמן. מה כיוון הזרם במסגרת?

ג. כעת נניח כי מהרגע  $t_0$  מושכים את המסגרת ימינה במהירות

$$v = \frac{d}{t_0}$$

חשב את הזרם המושרה במסגרת בפרק הזמן  $t_0 < t < 2t_0$ .

ד. חשב את העבודה שביצע הכוח שמשך את המסגרת בפרק הזמן של סעיף ג'.

**31 מציאת צפיפות זרם בגליל אינסופי**

גליל אינסופי בעל רדיוס  $6R$  מונח כך שצירו המרכזי מקביל לציר ה- $x$ . בתוך הגליל ישנו שדה

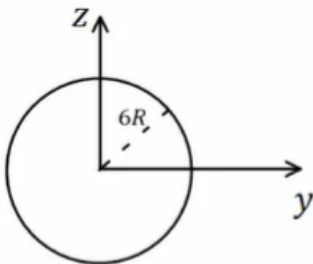
$$\vec{B}(x, y, z) = \frac{\mu_0 J_0 R}{\sqrt{y^2 + z^2}} (-z\hat{y} + y\hat{z})$$

ההתנגדות הסגולית של הגליל היא  $\rho_0$ .

א. מצא את צפיפות הזרם בגליל.

ב. מהו השדה החשמלי בתוך הגליל?

ג. מהו השדה המגנטי מחוץ לגליל?



**32 קבל מארבעה לוחות**

קבל מורכב מארבעה לוחות מוליכים ומקבילים בעלי שטח  $A$ , הממוקמים כך שהמרחק בין לוח ללוח הבא אחריו הוא  $d$  ( $d \ll A$ ). הלוח הראשון מחובר בחוט אידיאלי ללוח השלישי והלוח השני לרביעי.

חשב את קיבול המערכת.

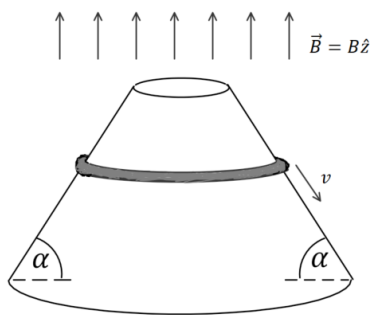
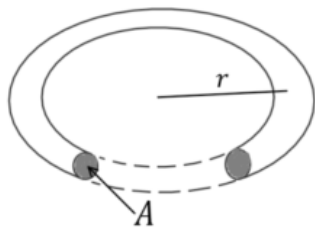
שים לב שמטעמי סימטריה צפיפות המטען על הלוחות הראשון והרביעי שווה והפוכה בסימן, כנ"ל גם עבור הלוח השני והשלישי.



**33 טבעת גמישה מחליקה על חרוט**

נתונה טבעת מוליכה בעלת רדיוס  $r$  ושטח חתך  $A$  כך שנפח הטבעת הוא  $V = 2\pi rA$ .

הטבעת עשויה מחומר גמיש במיוחד כך שבכל רגע נתון ניתן לשנות את רדיוס הטבעת ושטח החתך שלה (ללא הפעלת כוח או השקעת אנרגיה בקירוב), כל עוד נפח הטבעת נשאר קבוע. מוליכות הטבעת היא  $\sigma$  ומסתה היא  $m$ .



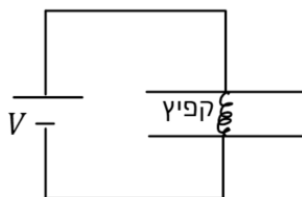
- א. מצא את ההתנגדות הכוללת של הטבעת  $R$  באמצעות  $\sigma, V, r$ .
- ב. מניחים את הטבעת על חרוט מעגלי חסר חיכוך בעל זווית בסיס  $\alpha$ , ונותנים לה להחליק כלפי מטה בהשפעת כוח הכובד. נתון כי קיים בכל המרחב שדה מגנטי אחיד  $B$  בכיוון ציר החרוט.

- חשב את הכא"מ והזרם בטבעת כתלות ב- $r$  וב- $v$  המהירות הרגעית של הטבעת. מהו כיוון הזרם ביחס לשדה המגנטי?
- ג. מצאו את הכוח המגנטי (גודל וכיוון) הפועל על אלמנט אורך של הטבעת  $\Delta l$ .
- ד. הראו כי קיימת מהירות שאינה תלויה ב- $r$  בה שקול הכוחות על האלמנט אורך  $\Delta l$  בכיוון מקביל למהירות מתאפס. בטאו את המהירות באמצעות  $B, \alpha, m, g, V$ .

**34 קבל וקפיץ לא לינארי**

קבל ולוחות מורכב משני לוחות מעגליים בעלי שטח  $A$ . בין הלוחות מחובר קפיץ לא מוליך המפעיל כוח לא לינארי שגודלו הוא  $F = k\Delta l^2$ . כאשר  $\Delta l$  היא ההתארכות של הקפיץ מהמצב הרפוי. האורך הרפוי של הקפיץ הוא  $l_0$  ונתון כי  $l_0 \ll \sqrt{A}$ .

- א. מחברים את הקבל לסוללה בעלת מתח  $V$ . מה המטען על הקבל ומהי ההתארכות של הקפיץ במצב היציב?
- ב. מקרבים את הלוחות של הקבל אחד אל השני לאט מאוד כך שהמרחק

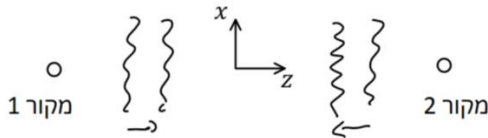


- בניהם נתון על ידי  $x(t) = l_0 - ut$ . מה ההספק של הסוללה בתהליך? מהו קצב שינוי האנרגיה בקבל? הסבר מדוע הגדלים אינם שווים.
- ג. מחזירים את הלוחות למצב של סעיף א', מנתקים את הסוללה ומחברים במקומה נגד  $R$ . הדיפרנציאלית שפתרונה ייתן את המטען על הקבל כתלות בזמן, הניחו שמסת הלוחות זניחה. אין צורך לפתור את המשוואה.

**35 גלים- צפיפות אנרגיה בהתאבכות**

נתונים שני מקורות המשדרים גלים אלקטרומגנטיים בתדר זהה  $\omega$  אך באמפליטודה שונה  $E_1$  ו- $E_2$ . שני המקורות נמצאים במרחק גדול אחד מהשני על ציר  $z$  ומשדרים גלים אחד כלפי השני.

מקור אחד משדר גלים המתקדמים בכיוון החיובי של ציר  $z$  והמקור השני בכיוון השלילי של ציר  $z$ .

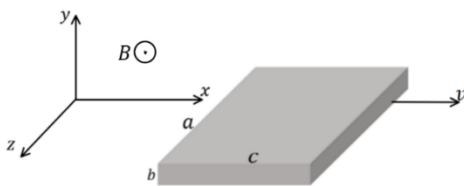


נקבע את ראשית הצירים באמצע בין המקורות ונניח שבאזור הראשית הגלים הן בקירוב גלים מישוריים.

- א. רשמו ביטוי לשדה החשמלי והמגנטי של כל אחד מהמקורות בנפרד. כלומר כאילו רק אחד מהם פועל.
- ב. רשמו ביטוי לצפיפות האנרגיה של כל אחד מהגלים בנפרד באזור הראשית. מומלץ לבצע ממוצע על זמן מחזור.
- ג. כעת מפעילים את שני המקורות יחדיו והגלים מתאבכים. רשמו ביטוי לצפיפות האנרגיה כאשר שני המשדרים עובדים באותה הפאזה ובהפרש פאזה של  $\pi$ . האם בהתאבכות נשמרת צפיפות האנרגיה?

**36 תיבה דקה נעה בשדה מגנטי**

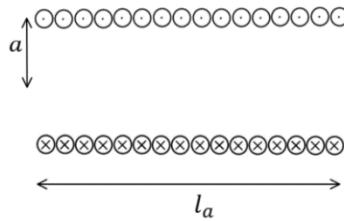
תיבה דקה עשויה מחומר מוליך ומונחת במקביל לצירים. ממדי התיבה הן  $a, b, c$  כאשר  $b \ll a, c$  ראה איור. במרחב קיים שדה מגנטי  $B\hat{z}$ . נתון כי התיבה ניטרלית. התיבה נעה במהירות קבועה  $v\hat{x}$  ביחס למעבדה.



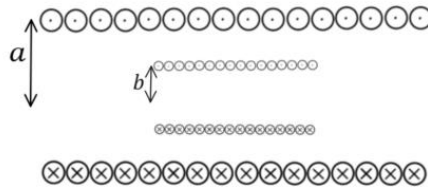
- א. מצאו את צפיפות המטען המשטחית והנפחית בתיבה ביחס למערכת המעבדה.
- ב. פתרו שוב את סעיף א' מתוך מערכת המנוחה של התיבה.
- ג. חשבו את הוקטור פוינטינג במערכת המעבדה בתוך ומחוץ לתיבה. הסבירו את התשובה שקיבלתם.

**37) סליל בתוך סליל בתוך שדה**

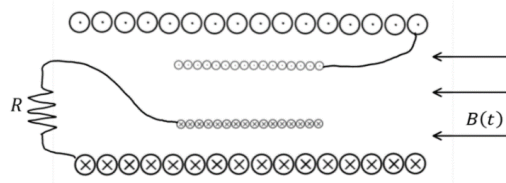
נתון סליל באורך  $l_a$ , רדיוס  $a$  ו- $n_a$  ליפופים ליחידת אורך. נתון  $l_a \ll a$ .  
א. מצא את הפוטנציאל הוקטורי בכיול קולון בכל המרחב כתלות בזרם הזורם בסליל.



ב. מכניסים לתוך הסליל סליל נוסף קטן יותר בעל אורך  $l_b$  רדיוס  $b$  וצפיפות ליפופים ליחידת אורך  $n_b$ . הנח כי  $l_a \gg l_b$ . מצא את ההשראות ההדדית בין הסלילים.

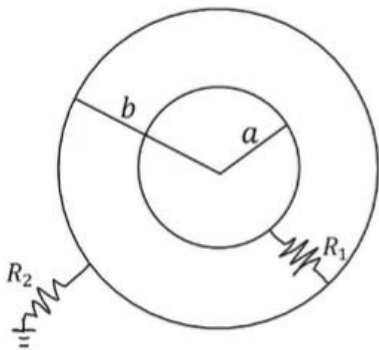


ג. מחברים את הסלילים בטור דרך נגד  $R$  כך שכיוון הזרם בשני הסלילים זהה. מדליקים שדה מגנטי התלוי בזמן  $B(t) = \beta t$  כאשר  $\beta$  קבוע חיובי בכיוון ציר הסימטריה של הסלילים. מהו הזרם כתלות בזמן במעגל?



**38) שתי קליפות נפרקות**

שתי קליפות כדוריות מוליכות בעלות מרכז משותף ורדיוסים  $a$  ו- $b$  טעונות במטענים  $Q_0$  ו- $-Q_0$  בהתאמה. מחברים את הקליפות בנגד  $R_1$  ומאריקים את הקליפה החיצונית דרך נגד  $R_2$ .



א. מהן המשוואות הדיפרנציאליות המתארות את המטענים על הקליפות כתלות בזמן?  
ב. מצאו את המטען על כל קליפה כתלות בזמן.

## תשובות סופיות:

$$(1) \quad \text{א. } -\frac{KQ}{6R} \quad \text{ב. } -\frac{KQ}{2R} \quad \text{ג. } -\frac{KQ}{2R} \quad \text{ד. } -\frac{KQ}{6R}$$

$$(2) \quad \text{א. } 24\epsilon_0 \quad \text{ב. } U = \frac{208}{3}\epsilon_0 \quad \text{ג. } -6$$

$$(3) \quad \vec{E} = \begin{cases} \frac{\rho r}{2\epsilon_0} \hat{r} & 0 < r < a \\ \frac{\rho a^2}{2\epsilon_0 r} \hat{r} & a < r < b \\ 0 & b < r \end{cases} \quad \text{א. } \frac{\rho}{\sigma} = -\frac{2b}{a^2}$$

$$\varphi = \begin{cases} \frac{\rho r^2}{4\epsilon_0} + \frac{\rho a^2}{2\epsilon_0} \left( \ln \frac{b}{a} + \frac{1}{2} \right) & 0 < r < a \\ \frac{\rho a^2}{2\epsilon_0} \ln \frac{b}{a} & a < r < b \\ 0 & b < r \end{cases} \quad \text{ג.}$$

$$\vec{B} = \begin{cases} \frac{\mu_0 V}{2} (\rho r) \hat{\theta} & 0 < r < a \\ \frac{\mu_0 V}{2} \left( \frac{\rho a^2}{r} \right) \hat{\theta} & a < r < b \\ \frac{\mu_0 V}{2} \left( \frac{\rho a^2 - \sigma 2b}{r} \right) \hat{\theta} & b < r \end{cases} \quad \text{ד.}$$

$$(4) \quad \text{א. } I_1(t) = \frac{\mu_0 I_0 a V_1 \cos \theta}{2\pi} \left( \frac{1}{x(t)+a} - \frac{1}{x(t)} \right) \quad \text{עם כיוון השעון.}$$

$$\text{ב. } \vec{F}_{ext} = \frac{-\mu_0 I_0 I_1 a}{2\pi} \left( \frac{1}{x(t)+a} - \frac{1}{x(t)} \right) \hat{x} \quad \text{ג. } P_{ext} = |F| |V_1| \cos \theta, \quad P_R = I_1^2 R$$

$$(5) \quad \text{א. } I_1 = \frac{|\mathcal{E}|}{R}, \quad \text{נגד כיוון השעון.} \quad \text{ב. } \vec{F}_{ext} = \frac{-\mu_0 I_1 I_0 a}{4\pi} \left( \frac{1}{y_1+a} - \frac{1}{y_1} \right) (\hat{x} + \hat{y})$$

$$\text{ג. } P_{ext} = \frac{\mu_0 I_1 I_0 a}{4\pi} \left( \frac{1}{y_1} - \frac{1}{y_1+a} \right) V \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot 2, \quad P_R = I_1^2 R = P_{ext}$$

ב. שדה מושרה-בכיוון השדה הקיים, זרם  $|\varepsilon| = B_0 L v_y$  .א (6)

במעגל- בכיוון השעון.  $F_B = -\frac{B_0^2 L^2}{R} v \hat{y}$  .ג  $v_{final} = \frac{mgR}{B_0^2 \cdot L^2}$  .ד

ה.  $k = \frac{B_0^2 L^2}{R}$  ,  $v(t) = \left(1 - e^{-\frac{k}{m}t}\right) \frac{mg}{k}$

א.  $I(t) = \frac{BLV}{R} e^{-\frac{t}{RC}}$  עם השעון.  $\vec{F}_{ext} = \frac{B^2 L^2 V}{R} e^{-\frac{t}{RC}} \hat{x}$  .ב

ג.  $P_F = \frac{B^2 L^2 V^2}{R} e^{-\frac{t}{RC}}$  .ד  $P_C = \frac{B^2 L^2 V^2}{R} \left( e^{-\frac{t}{RC}} - e^{-\frac{2t}{RC}} \right)$  .ה. הוכחה.

א.  $\vec{B} = \mu_0 \sigma R \omega \hat{z}$  .ב  $\vec{B} = \mu_0 \rho \omega \left( \frac{R^2 - r^2}{2} \right) \hat{z}$  (8)

א.  $E_2^+ = \frac{KQ}{2R^2}$  .ב  $E_2 = \frac{KQ}{2R^2} \left( 1 + \frac{1}{\sqrt{2}} \right)$  (9)

ג.  $\varphi_2 = \frac{KQ}{R} \left( 1 - \frac{a^2}{4R^2} \right)$  ,  $E_2 = 0 - \left( -\frac{KQa^2}{4R^4} \hat{z} \right)$

א.  $I = \frac{B\pi a^2 \omega}{4R} \sin \omega t$  .ב.  $\theta = 60^\circ$  .ג.  $\theta = 45^\circ$  (10)

א.  $d = \frac{a^3 E_0}{kq}$  .ב. מקרה 1:  $W_1 = \frac{a^3 E_0^2}{2k}$  , מקרה 2:  $W_1 = E_0 \frac{a^3 E_0}{k}$  (11)

ג.  $\vec{E} = \frac{K2qd}{x^3} \hat{x}$  .ד.  $\vec{P} = qd \hat{x}$

(12)  $\phi_{E_1} = \frac{q}{6\varepsilon_0}$

(13)  $v = \frac{3Rmg}{2B^2 L^2}$

(14)  $v = \frac{qB^2 Ld}{2m}$

א.  $U_T = 2C \left( \frac{V}{3} \right)^2$  .ב.  $U_T = \frac{1}{2} \varepsilon_r C \left( \frac{V}{3} \right)^2 + \frac{1}{2} C \left( \frac{V}{3} \right)^2 + \frac{1}{2} \frac{C}{3} \left( \frac{2}{3} V \right)^2$  (15)

$$E = \begin{cases} \frac{kq}{r^2} \hat{r} & r < r_1 \\ 0 & r_1 < r < r_2 \\ \frac{kq}{r^2} \hat{r} & r_2 < r < r_3 \\ \frac{k(q + \sigma 4\pi r_3^2)}{r^2} & r_3 < r \end{cases} \quad \text{א. (16)}$$

$$\varphi = \begin{cases} \frac{kq}{r} + C_1 & r < r_1 \\ C_2 & r_1 < r < r_2 \\ \frac{kq}{r} + C_3 & r_2 < r < r_3 \\ \frac{k(q + \sigma 4\pi r_3^2)}{r} & r_3 < r \end{cases} \quad \text{ב.}$$

ד. אין השפעה.

$$\sigma(r_1) = \frac{-q}{4\pi r_1^2}, \quad \sigma(r_2) = \frac{q}{4\pi r_2^2} \quad \text{ג.}$$

$$\vec{B} = \frac{\sigma \beta t}{2} \begin{cases} -\hat{y} & z > 0 \\ +\hat{y} & z < 0 \end{cases} \quad \text{ב.} \quad \vec{k} = \sigma \cdot \beta \cdot t \hat{x} \quad \text{א. (17)}$$

$$\text{עם השעוון, } I = \frac{|\varepsilon|}{R} \quad \text{ד.} \quad \phi_B = Ba^2 \quad \text{ג.}$$

$$\text{ג. } I = \frac{B_0 HV}{R}, \quad \text{נגד כיוון השעוון.} \quad \text{ב. } q = C \cdot B_0 HV \quad \text{א. (18)} \quad \varepsilon = -B \cdot HV$$

$$I = \dot{q} = \frac{\varepsilon}{R} e^{-\frac{t}{RC}} \quad \text{ד.}$$

$$I_d = \frac{-\rho V_0}{3} \cdot \pi r^2 \quad \text{ב.} \quad \vec{E} = \frac{\rho r}{3\varepsilon_0} \hat{r} \quad r < a, \quad \vec{E} = \frac{\rho a^3}{3\varepsilon_0 r^2} \hat{r} \quad r > a \quad \text{א. (19)}$$

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 \rho V_0 r}{3} \hat{\theta} \quad \text{ד.} \quad I = \rho V_0 \pi r^2 \quad \text{ג.}$$

$$\vec{F}_T = \left( -\frac{kq^2}{(2a)^2} + 2kqp \left( \frac{1}{(a-b)^3} + \frac{1}{(a+b)^3} \right) \right) \hat{z} \quad \text{א. (20)}$$

$$W_{ext} = -\frac{kq^2}{4a} + kqp \left( \frac{1}{(a-b)^2} + \frac{1}{(a+b)^2} \right) \quad \text{ב.}$$

$$\varphi = \begin{cases} -\frac{\rho_0 r^4}{16\epsilon_0 L^2} + V_0 & r \leq L \\ -\frac{\rho_0 L^2}{4\epsilon_0} \ln r + V_0 - \frac{\rho_0 L^2}{4\epsilon_0} \left( \frac{1}{4} - \ln L \right) & r \geq L \end{cases} \quad \text{ב.} \quad \vec{E} = \begin{cases} \frac{\rho_0 r^3}{4\epsilon_0 L^2} \hat{r} & r < L \\ \frac{\rho_0 L^2}{4r} \hat{r} & r > L \end{cases} \quad \text{א. (21)}$$

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 \rho_0 u_0}{4} \begin{cases} \frac{r^3}{L^2} \hat{\theta} & r < L \\ \frac{L^2}{r} \hat{\theta} & r > L \end{cases} \quad \text{ג.}$$

$$I = \frac{\mu_0 I b}{2\pi R} \left( \frac{1}{D+b+u_1} u_1 - \frac{1}{D+u_1 t} u_1 \right) \quad \text{ד. עם כיוון השעון.}$$

$$Q = \frac{\epsilon_0 V_0}{d \cdot \ln 2} \cdot V_0, \quad \sigma = \frac{\epsilon_0 V_0}{d \cdot \ln 2} \quad \text{ב.} \quad C_T = \frac{\epsilon_0 \cdot a \cdot b}{d \cdot \ln 2} \quad \text{א. (22)}$$

$$U = \frac{ab\sigma^2 d}{2\epsilon_0} \ln\left(\frac{3}{2}\right) \quad \text{ד.} \quad \vec{E} = -\frac{\sigma}{\epsilon_0 \left(1 + \frac{y}{d}\right)} \hat{y} \quad \text{ג.}$$

$$\epsilon F = 0! \quad , \quad \vec{\tau} = \frac{\mu_0 I_1 I_2 \hat{y}}{2\pi} 2R \left( \sin \frac{\alpha}{2} - \alpha \cos \frac{\alpha}{2} \right) \quad \text{(23)}$$

$$E = \frac{Cr^4}{6\epsilon_0} - \frac{KQ}{2r^2} \quad \text{ג.} \quad E = \begin{cases} \frac{Cr^4}{6\epsilon_0} & r < R \\ \frac{KQ}{r^2} & R < r \end{cases} \quad \text{ב.} \quad C = \frac{3Q}{2\pi R^6} \quad \text{א. (24)}$$

$$t = 12 \text{ sec} \quad \text{ג.} \quad C = \frac{1}{\gamma 2(b^2 - a^2)} \quad \text{ב.} \quad C = \frac{1}{\gamma 2(b^2 - a^2)} \quad \text{א. (25)}$$

$$\vec{E} = \frac{\sigma R}{\epsilon_0} \cdot \frac{(5x, y, 0)}{(25x^2 + y^2)} - \frac{\sigma R}{\epsilon_0} \cdot \frac{(x, y, 0)}{(x^2 + y^2)} \quad \text{ב.} \quad \vec{E} = \frac{R\sigma}{\epsilon_0} \cdot \frac{(x\hat{x} + y\hat{y})}{(x^2 + y^2)} \quad \text{א. (26)}$$

$$\Delta\varphi = \frac{4\sigma R}{5\epsilon_0} \ln \frac{R}{x_0} \quad \text{ג.}$$

$$\phi_B = \frac{\mu_0 C t^2 a^4}{3} \ln 2 \quad \text{ב.} \quad \vec{B}(r, t) = \frac{\mu_0 C t^2 a^3}{3r} \hat{\theta} \quad r > a \quad \text{א. (27)}$$

$$\text{נגד כיוון השעון.} \quad I = \frac{\mu_0 C \cdot 2 \cdot ta^5 \ln 2 \cdot \pi}{3} \cdot 10^{-4} \quad \text{ג.}$$

$$\vec{F} = \frac{Ia}{3} 7R^3 \hat{x} \quad \text{ג.} \quad \text{ב. שלילי} \quad \vec{B}_z = \frac{0.396\mu_0 I}{R} \hat{z} \quad \text{א. (28)}$$

$$\varepsilon = \begin{cases} BV(a - Vt) & t \leq \frac{a}{V} \\ BV(2a - Vt) & \frac{a}{V} \leq t \leq \frac{2a}{V} \\ 0 & \frac{2a}{V} \leq t \end{cases} \text{ נ.א. (29)}$$

$$P(t) = \begin{cases} (BV(a - Vt))^2 \cdot \frac{1}{R} & t < \frac{a}{V} \\ (BV(2a - Vt))^2 \cdot \frac{1}{R} & \frac{a}{V} < t \leq \frac{2a}{V} \\ 0 & \frac{2a}{V} \leq t \end{cases} \text{ ג.}$$

$$F = \begin{cases} (BV(a - Vt))^2 \cdot \frac{1}{R \cdot V} & t < \frac{a}{V} \\ (BV(2a - Vt))^2 \cdot \frac{1}{R \cdot V} & \frac{a}{V} < t \leq \frac{2a}{V} \\ 0 & \frac{2a}{V} \leq t \end{cases} \text{ ג.}$$

$$I = \begin{cases} 0 & 0 \leq t < t_0 \\ \frac{d \cdot L \cdot B}{R \cdot t_0} & t_0 < t < 2t_0 \\ 0 & 2t_0 < t \end{cases} \text{ ג.}$$

$$|\varepsilon| = \begin{cases} 0 & 0 \leq t < t_0 \\ \frac{d \cdot L \cdot B}{t_0} & t_0 < t < 2t_0 \\ 0 & 2t_0 < t \end{cases} \text{ נ.א. (30)}$$

$$W = \frac{-B^2 L^2 d^2}{3Rt_0} \text{ ד.}$$

$$\text{ג. עם השעון, } I = \frac{2BLd}{Rt_0} \left( \frac{t}{t_0} - 1 \right)$$

$$\vec{E} = \rho_0 J_0 R \cdot \frac{1}{r} \hat{z} \quad r < 6R \text{ ג.} \quad \vec{J}(r) = \frac{J_0 R}{r} \hat{z} \quad r < 6R \text{ נ.א. (31)}$$

$$B = \frac{\mu_0 J_0 6R^2}{r} \quad r > 6R \text{ ג.}$$

$$c = \frac{3\varepsilon_0 A}{d} \text{ (32)}$$

$$\varepsilon = B \cdot 2\pi r V \cos \alpha, \quad I = \frac{B \sigma V v \cos \alpha}{2\pi r} \quad -\hat{\theta} \text{ בכיוון } \hat{\theta} \text{ ג.} \quad R = \frac{(2\pi r)^2}{\sigma V} \text{ נ.א. (33)}$$

$$V = \frac{mg \sin \alpha}{B^2 \sigma V \cos^2 \alpha} \text{ ד.} \quad d\vec{F} = \frac{B^2 \sigma V v \cos \alpha}{2\pi r} (-\hat{r}) d \text{ ג.}$$

$$\Delta l = \frac{l_0 - \sqrt{l_0^2 - 4\sqrt{\frac{\epsilon_0 AV^2}{2k}}}}{2}, \quad Q = \frac{2\epsilon_0 AV}{l_0 + \sqrt{l_0^2 - 4\sqrt{\frac{\epsilon_0 AV^2}{2k}}}} \quad \text{א. (34)}$$

$$Q \left( \frac{l_0 - \frac{Q}{\sqrt{2\epsilon_0 Ak}}}{\epsilon_0 A} \right) = -QR \quad \text{ג.} \quad p = \frac{\epsilon AuV^2}{(l_0 - ut)^2}, \quad \frac{du}{dt} = \frac{\epsilon_0 AuV^2}{2(l_0 - ut)^2} \quad \text{ב.}$$

$$\vec{E}_1 = E_1 \cos\left(\frac{\omega}{c}z - \omega t\right) \hat{x}, \quad \vec{B}_1 = \frac{E_1}{c} \cos\left(\frac{\omega}{c}z - \omega t\right) \hat{y} \quad \text{א. (35)}$$

$$\vec{E}_2 = E_2 \cos\left(\frac{\omega}{c}z + \omega t\right) \hat{x}, \quad \vec{B}_2 = \frac{E_2}{c} \cos\left(\frac{\omega}{c}z + \omega t\right) (-\hat{y})$$

$$u_2 = \epsilon_0 E_2^2 \cos^2 \omega t, \quad \bar{u}_2 = \frac{\epsilon_0 E_2^2}{2}, \quad u_1 = \epsilon_0 E_1^2 \cos^2 \omega t, \quad \bar{u}_1 = \frac{\epsilon_0 E_1^2}{2} \quad \text{ב.}$$

$$, \quad \bar{u}_T = \frac{1}{2} \epsilon_0 (E_1^2 + E_2^2), \quad u_T = \epsilon_0 \left( E_1^2 \cos^2\left(\frac{\omega}{c}z - \omega t\right) + E_2^2 \cos^2\left(\frac{\omega}{c}z + \omega t\right) \right) \quad \text{ג.}$$

האנרגיה נשמרת.

$$\vec{S} = \frac{\gamma^4 V B^2}{\mu_0} \hat{x} \quad \text{ג.} \quad \sigma' = \pm \epsilon_0 V \gamma B \quad \text{ב.} \quad \sigma = \pm \epsilon_0 V \gamma^2 B \quad \text{א. (36)}$$

$$M = \mu_0 n_a n_b l_b \pi b^2 \quad \text{ב.} \quad \vec{A} = \frac{\mu_0 n_a I}{2} \begin{cases} r \hat{\theta} & r < a \\ a^2 \frac{\hat{\theta}}{r} & a < r \end{cases} \quad \text{א. (37)}$$

$$I(t) = \frac{V_0}{R} \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right), \quad \tau = \frac{R}{L}, \quad V_0 = \beta \pi b^2 n_b l_b \quad \text{ג.}$$

$$L = \mu_0 \pi a^2 R_a^2 l_a + \mu_0 \pi b^2 n_b^2 l_b + 2 \mu_0 n_a n_b l_b \pi b^2$$

$$q_1 K = \left( \frac{1}{a} - \frac{1}{b} \right) = -q_1 R_1, \quad \frac{K(q_1 + q_2)}{b} = -\left( \frac{1}{a} - \frac{1}{b} \right) R_2 \quad \text{א. (38)}$$

$$q_1(t) = Q_0 e^{-\frac{t}{\tau}} = -q_2(t), \quad \tau = \frac{R_1}{K \left( \frac{1}{a} - \frac{1}{b} \right)} \quad \text{ב.}$$