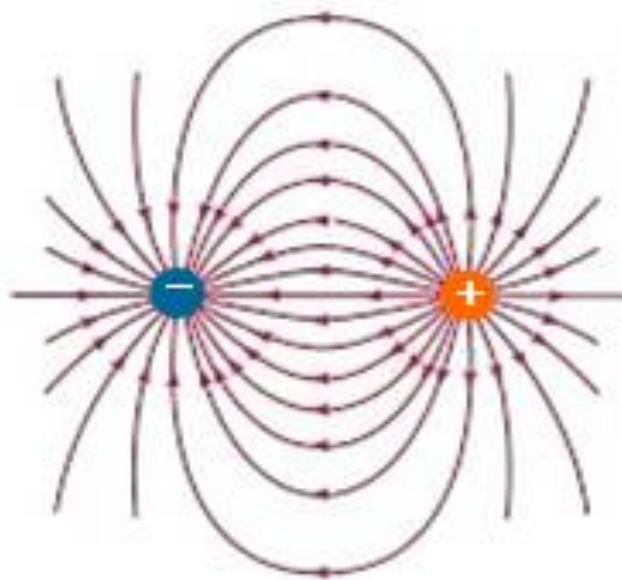


אלקטרוסטטיקה

השדה החשמלי



❖ **עוצמת השדה החשמלי** בנקודה מוגדרת ככוח הפועל על יחידת מטען **חיובי** המצויה בנקודה זו:

$$\rho_E = \frac{F_E}{q}$$

$$[E] = \frac{[F_E]}{[q]} = \frac{N}{C}$$

❖ יחידת השדה החשמלי היא:

❖ ניתן לתאר את השדה החשמלי בעזרת קווים הנקראים **קווי שדה**. קווים אלו מצביעים על כיוון הכוח

שהיה פועל על מטען **חיובי** שיונח באותה נקודה. צפיפות קווי השדה מצביעה על **עוצמת השדה**.

❖ השדה החשמלי, הנוצר בנקודות שונות במרחב על ידי כדור מוליך טעון, שהמטען מפוזר על פניו באופן

אחיד, שווה לשדה שהיה נוצר בנקודות אלו, אילו כל המטען היה מרוכז במרכז הכדור.

❖ השדה החשמלי של לוח אינסופי, הטעון בצפיפות מטען אחידה, הוא שדה אחיד.

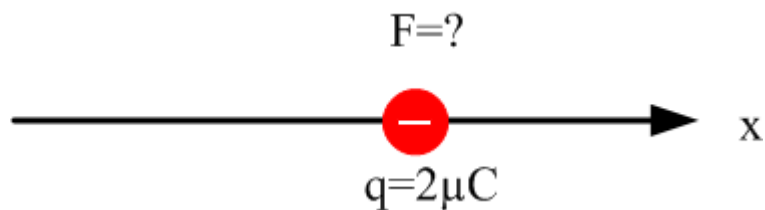
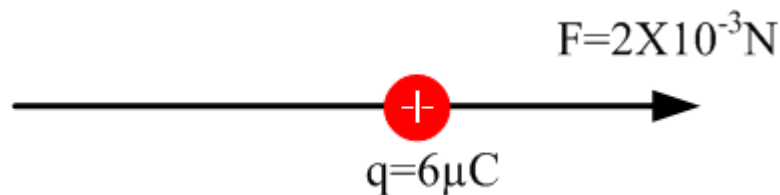
❖ בין שני לוחות אינסופיים, המקבילים זה לזה וטעונים במטענים שווים בגודלם והפוכים בסימנם, קיים

שדה חשמלי אחיד, שכיוונו מהלוח הטעון חיובית אל זה הטעון שלילית. מחוץ ללוחות השדה הוא 0.

על מטען חשמלי נקודתי של $+6\mu\text{C}$ פועל כוח של $2 \cdot 10^{-3} \text{ N}$ בכיוון החיובי של ציר x .

א- מהו השדה החשמלי בנקודה זו (גודל וכיוון)?

ב- מה הכוח שיפעל על מטען חשמלי בן $-2\mu\text{C}$, שיוצב במקום המטען שבסעיף א' (גודל וכיוון)?



על מטען חשמלי נקודתי של $+6\mu\text{C}$ פועל כוח של $2 \cdot 10^{-3} \text{ N}$ בכיוון החיובי של ציר x.
א- מהו השדה החשמלי בנקודה זו?

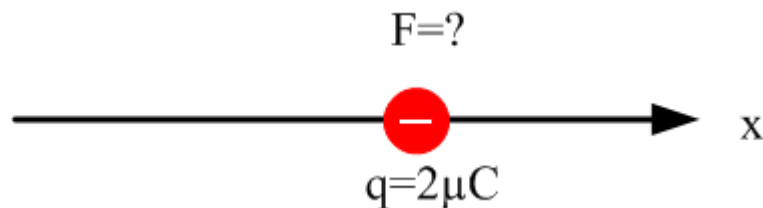
◀ ניעזר בנוסחת השדה החשמלי:

$$E = \frac{F}{q}$$

$$E = \frac{2 \cdot 10^{-3}}{6 \cdot 10^{-6}} = 0.333 \cdot 10^3 = 333 \frac{\text{N}}{\text{C}}$$

◀ הואיל והמטען חיובי, והכוח הפועל עליו הוא בכיוון החיובי של ציר x, גם כיוון השדה הוא בכיוון החיובי של ציר x (כיוון השדה נקבע על פי כיוון הכוח הפועל על מטען חשמלי חיובי).

- ב- מה הכוח שיפעל על מטען חשמלי בן $-2\mu\text{C}$, שיוצב במקום המטען שבסעיף 1?
 ◀ המטען השלילי מצוי באותו השדה החשמלי שחישבנו קודם, ולכן:



$$E = \frac{F}{q}$$

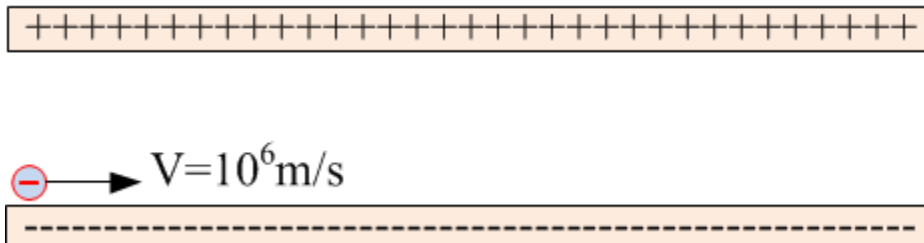
$$F = qE$$

$$F = 2 \cdot 10^{-6} \cdot 333 = 666 \cdot 10^{-6} \text{ N} = 0.666 \text{ mN}$$

- ◀ כיוונו של הכוח הוא הכיוון השלילי של ציר x.

אלקטרון חודר לשדה חשמלי אחיד בין לוחות הטעונים כמוראה בתרשים.
נתון: $E=10^3 \text{ N/C}$, $e=1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$, $m_e=9.1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$.
הלוחות מצויים בריק והמרחק ביניהם הוא 0.5 cm .

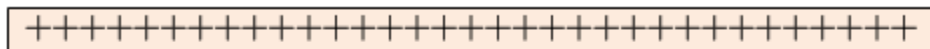
- א- מה כיוון השדה?
- ב- מה הכוח שיפעל על האלקטרון (גודל וכיוון)?
- ג- מה משך הזמן שיעבור עד שהאלקטרון יפגע בלוח העליון?
- ד- מה המרחק האופקי x שיעבור האלקטרון במשך זמן זה?



אלקטרון חודר לשדה חשמלי אחיד בין לוחות הטעונים כמוראה בתרשים.

נתון: $E=10^3 \text{ N/C}$, $e=1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$, $m_e=9.1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$.

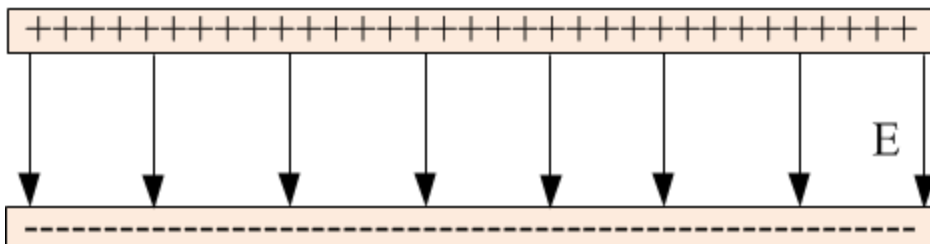
הלוחות מצויים בריק והמרחק ביניהם הוא 0.5 cm .



א- מהו כיוון השדה?

כיוון השדה נקבע על פי כיוון הכוח הפועל על מטען חשמלי חיובי, ולכן כיוונו יהיה מהלוח הטעון חיובית אל הלוח הטעון שלילית.

הואיל וזהו שדה קבוע, כיוונו ועוצמתו אחידים בכל האזור שבין הלוחות.



אלקטרון חודר לשדה חשמלי אחיד בין לוחות הטעונים כמוראה בתרשים.

נתון: $E=10^3 \text{ N/C}$, $e=1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$, $m_e=9.1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$.

הלוחות מצויים בריק והמרחק ביניהם הוא 0.5 cm .

ב- מהו הכוח שיפעל על האלקטרון (גודל וכיוון)?

◀ הכוח שיפעל על האלקטרון הוא:

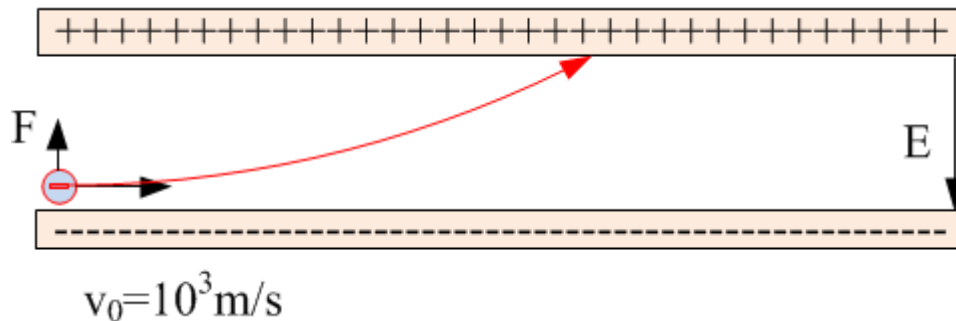
$$F = qE$$

$$F = 1.6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^3 = 1.6 \cdot 10^{-16} \text{ N}$$

◀ כיוון הכוח הוא בניגוד לכיוון קווי השדה, כלומר כלפי מעלה.

ג- מה משך הזמן שיעבור עד שהאלקטרון יפגע בלוח העליון?

▶ בהזנחת כוח הכבידה, הכוח היחיד הפועל על האלקטרון הוא הכוח החשמלי בכיוון מעלה. בנוסף, לאלקטרון יש מהירות התחלתית (שנותרת קבועה) בכיוון x. זוהי למעשה "זריקה אופקית", רק שהכוח (הקבוע) פועל מעלה ולא מטה.



▶ נחשב את תאוצת האלקטרון בכיוון y:

$$a = \frac{F}{m} = \frac{1.6 \cdot 10^{-16}}{9.1 \cdot 10^{-31}} = 1.76 \cdot 10^{14} \text{ m/s}^2$$

▶ הואיל ובכיוון y המהירות ההתחלתית של האלקטרון היא 0:

$$y = \frac{1}{2} a t^2$$

$$0.5 \cdot 10^{-2} = \frac{1}{2} 1.76 \cdot 10^{14} t^2$$

$$t = 7.54 \cdot 10^{-9} \text{ s}$$

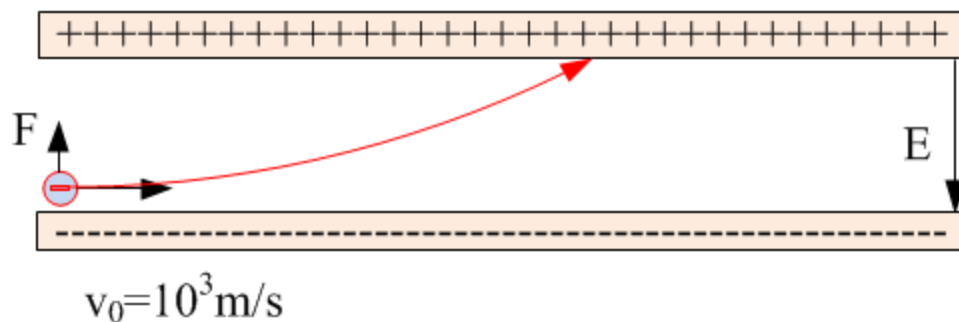
ד- מה המרחק האופקי x שיעבור האלקטרון במשך זמן זה?

◀ בכיוון אופקי מהירותו של האלקטרון קבועה, ולכן:

$$x = v_0 t$$

$$x = 10^6 \cdot 7.54 \cdot 10^{-9}$$

$$x = 7.54 \cdot 10^{-3} m = 0.754 cm$$

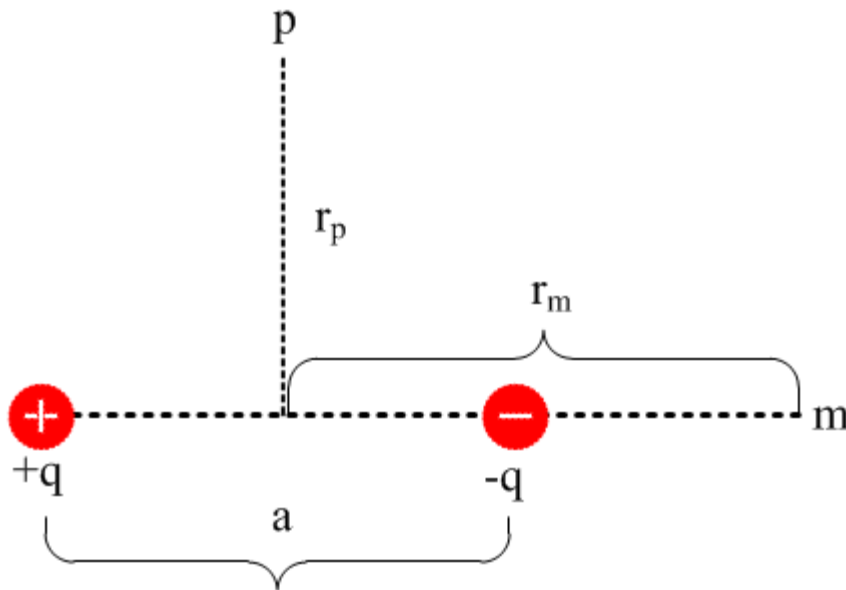


נתון מערך של שני מטענים שווים בגודלם והפוכים בסימנם.
מערך כזה נקרא דיפול, או בעברית דו-קוטב חשמלי (ראו תרשים).

1. הראו כי עוצמת השדה החשמלי בנקודה p כאשר $r_p \gg a$, היא: $\frac{kaq}{r_p^3}$. מה כיוונו?

2. הראו כי עוצמת השדה החשמלי בנקודה m כאשר $r_m \gg a$, היא: $2k \frac{qa}{r_m^3}$. מה כיוונו?

3. השוו את התוצאות שקיבלתם עבור שני המקרים.



א- הראו כי עוצמת השדה החשמלי בנקודה p כאשר $r_p \gg a$, היא: $\frac{kaq}{r_p^3}$

◀ נבדוק את התרומה של כל אחד מהמטענים לשדה הנוצר ב- p . מתקיים $E^- = E^+$ (השדות שווים בגודלם),

וכיוונם כמוראה בתרשים. נסמן: $E^- = E^+ = E$

◀ מטעמי סימטריה, בכיוון y השדה מתאפס, ובכיוון x הוא: $2E \cos \alpha$. זוהי עוצמת השדה בנקודה p . נחשב אותה.

$$E^+ = E^- = k \frac{q}{d^2}$$

$$d^2 = r_p^2 + \left(\frac{a}{2}\right)^2 \Rightarrow d = \sqrt{r_p^2 + \left(\frac{a}{2}\right)^2}$$

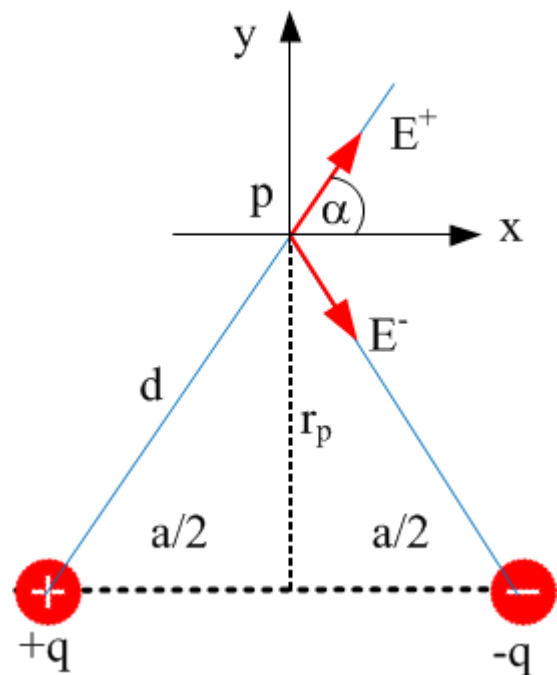
$$\cos \alpha = \frac{a/2}{d} = \frac{a}{2d}$$

$$2E \cos \alpha = 2k \frac{q}{d^2} \cdot \frac{a}{2d} = \frac{kaq}{d^3} = \frac{kaq}{\left[r_p^2 + \left(\frac{a}{2}\right)^2\right]^{3/2}}$$

◀ הואיל ו- $r_p \gg a$, ניתן להזניח את $a/2$ במכנה, ונקבל:

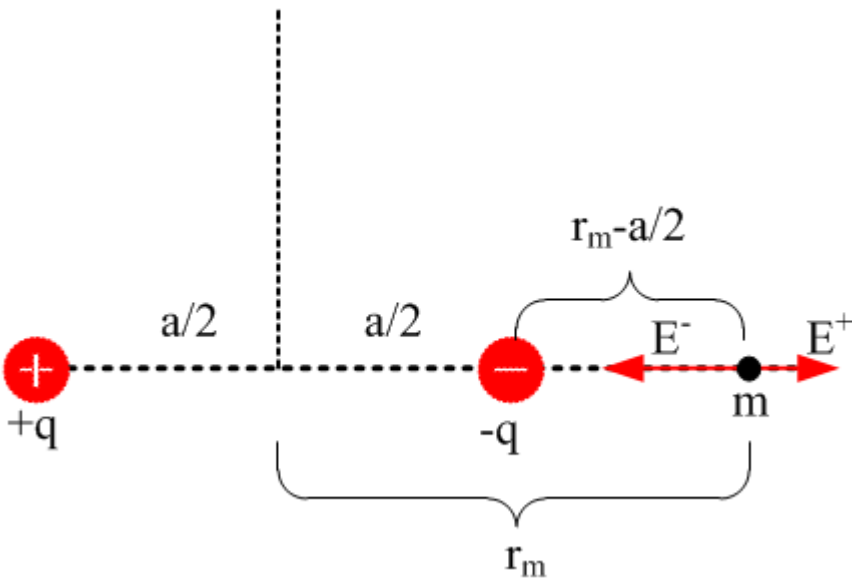
$$\frac{kaq}{\left[r_p^2\right]^{3/2}} = k \frac{qa}{r_p^3}$$

◀ כיוון השדה הוא הכיוון החיובי של ציר x .



ב- הראו כי עוצמת השדה החשמלי בנקודה m כאשר $r_m \gg a$, היא: $2k \frac{qa}{r_m^3}$

◀ נבדוק את התרומה של כל אחד מהמטענים לשדה הנוצר ב- p . מתקיים $E^- > E^+$ (m קרובה יותר ל- $-q$),
וכיוונם כמוראה בתרשים. נסמן: $E = E^- - E^+$, ונחשב את E



$$E = E^- - E^+ = k \left(\frac{q}{\left(r_m - \frac{a}{2}\right)^2} - k \frac{q}{\left(r_m + \frac{a}{2}\right)^2} \right)$$

$$E = kq \left[\frac{1}{\left(r_m - \frac{a}{2}\right)^2} - \frac{1}{\left(r_m + \frac{a}{2}\right)^2} \right] = kq \frac{\left(r_m + \frac{a}{2}\right)^2 - \left(r_m - \frac{a}{2}\right)^2}{\left(r_m^2 - \left(\frac{a}{2}\right)^2\right)^2}$$

$$E = kq \frac{2r_m a}{\left(r_m^2 - \left(\frac{a}{2}\right)^2\right)^2}$$

$$E = kq \frac{2r_m a}{\left(r_m^2 - \left(\frac{a}{2}\right)^2\right)^2} = 2kq \frac{r_m a}{r_m^4} = 2k \frac{qa}{r_m^3}$$

◀ הואיל ו- $r_m \gg a$, ניתן להזניח את $a/2$ במכנה, ונקבל:
◀ כיוון השדה הוא שמאלה, בכיוון השלילי של ציר x

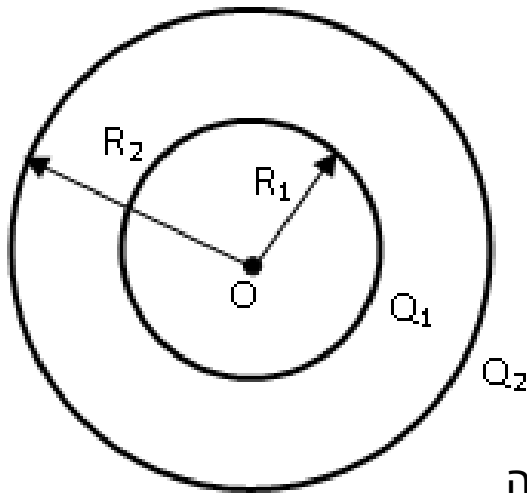
- ג- השוו את התוצאות שקיבלתם עבור שני המקרים.
 התוצאה שהתקבלה עבור נקודה המצויה לאורך האנך האמצעי של שני המטענים:

$$E = \frac{k a q}{r_p^3}$$

- התוצאה שהתקבלה עבור נקודה המצויה לאורך הקו המחבר את שני המטענים:

$$E = \frac{2 k a q}{r_m^3}$$

- המסקנה היא כי במערך של דיפול חשמלי, במקומות מרוחקים לאורך הקו המחבר את שני המטענים, השדה החשמלי גדול פי 2 מזה שקיים במקומות מרוחקים לאורך האנך האמצעי.
 בשני המקרים השדה נחלש (בחזקה שלישית) ככל שהמרחק מהדיפול גדל, ומתחזק ככל שהוא קטן.



◀ קליפה כדורית (כדור חלול) שרדיוסה R_1 נמצאת בתוך קליפה כדורית שרדיוסה R_2 , ולשתי הקליפות מרכז משותף O (ראה תרשים).

הקליפה הפנימית טעונה במטען חשמלי חיובי Q_1 , והקליפה חיצונית טעונה במטען חשמלי חיובי Q_2 . שתי הקליפות עשויות מחומר מוליך.

◀ בטאו באמצעות נתוני השאלה, את הגודל של השדה החשמלי הכולל, ששתי הקליפות יוצרות בכל אחת משלוש הנקודות (1)-(3):

א- הנקודה O .

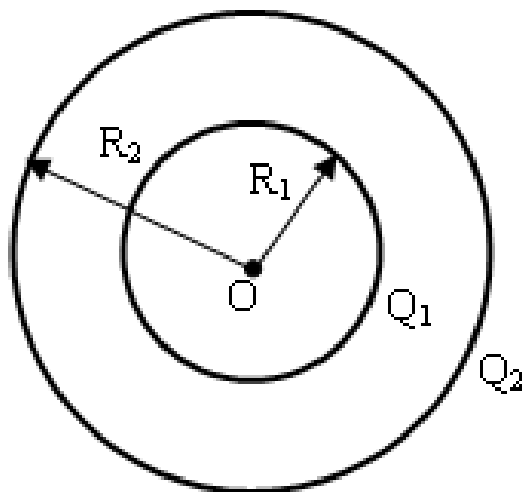
ב- נקודה הנמצאת מחוץ לקליפה הפנימית, אך קרובה אליה מאוד (מרחקה מ- O ייחשב ל- R_1).

ג- נקודה הנמצאת מחוץ לקליפה החיצונית, אך קרובה אליה מאוד (מרחקה מ- O ייחשב ל- R_2).

א- הנקודה O .

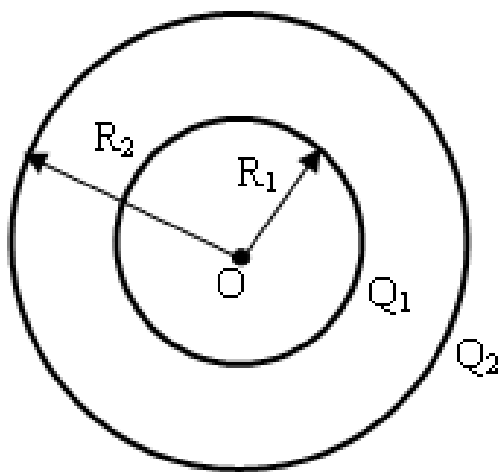
◀ בכל נקודה, השדה החשמלי הכולל נוצר מתרומה של שני הכדורים.

◀ הנקודה O היא במרכז שני הכדורים, ולכן השדה החשמלי הכולל בה הוא 0 .

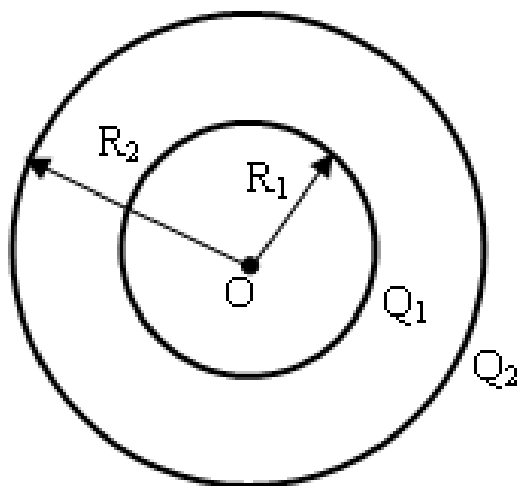


- ב- נקודה הנמצאת מחוץ לקליפה הפנימית, אך קרובה אליה מאוד (מרחקה מ- O ייחשב ל- R_1).
 הנקודה המבוקשת מצויה בתוך הקליפה החיצונית, ועל פני הקליפה הפנימית, ולכן השדה החשמלי הוא:

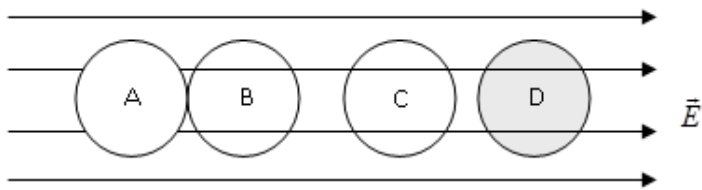
$$E = 0 + \frac{K \cdot Q_1}{R_1^2} = \frac{K \cdot Q_1}{R_1^2}$$



- ג- נקודה הנמצאת מחוץ לקליפה החיצונית, אך קרובה אליה מאוד (מרחקה מ- O ייחשב ל- R_2).
 הנקודה המבוקשת מצויה מחוץ לשתי הקליפות, ובמרחקים שווים משני המרכזים שלהן.
 לכן השדה החשמלי הוא:



$$E = \frac{K \cdot Q_1}{R_2^2} + \frac{K \cdot Q_2}{R_2^2} = \frac{K}{R_2^2} (Q_1 + Q_2)$$



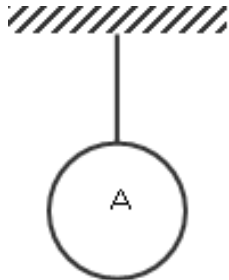
תרשים

◀ נתונים ארבעה כדורים לא טעונים, A, B, C, D.

כל הכדורים זהים בגודלם. הכדורים A ו-B נוגעים זה בזה. הכדורים A, B, ו-C עשויים מחומר מוליך, והכדור D עשוי מבודד.

מפעילים על הכדורים שדה חשמלי אחיד, שעוצמתו 100 וכיוונו ימינה, כמתואר בתרשים משמאל.

א- קבעו עבור כל אחד מארבעת הכדורים אם הוא נטען, ואם כן – מהו הסימן של המטען. נמקו את קביעותיכם.



תרשים

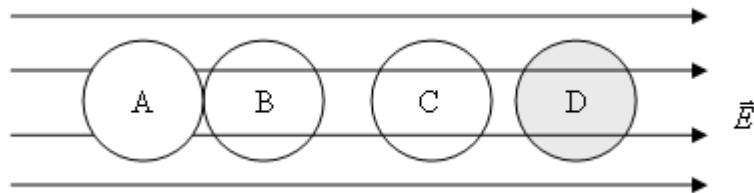
◀ מוציאים את כדור A מהשדה החשמלי ותולים אותו על חוט מבודד מחוץ לשדה (תרשים משמאל). מוציאים מהשדה החשמלי גם את הכדורים B, C ו-D.

ב- תארו מה יקרה לכדור A כאשר יקרבו אליו בכל פעם את אחד הכדורים האחרים. האם הכדור A יימשך, ידחה או יישאר במקומו? הניחו כי מטען הכדורים לא השתנה. נמקו את תשובותיכם.

◀ מקרבים את כדור B לכדור A. כדור A סוטה, ולאחר מכן הוא מתייבב, כך שמרכזי הכדורים A ו-B הם באותו גובה, והמרחק ביניהם הוא 2 cm. במצב זה נוצרת זווית של 5° בין החוט לאנך. מסת הכדור A היא 5 gr.

ג- מהו הערך של המטען החשמלי על פני כל אחד משני הכדורים A ו-B?

▶ נתונים ארבעה כדורים לא טעונים, A, B, C, D. כל הכדורים זהים בגודלם. הכדורים A ו-B נוגעים זה בזה. הכדורים A, B, ו-C עשויים מחומר מוליך, והכדור D עשוי מחומר מבודד. מפעילים על הכדורים שדה חשמלי אחיד, שעוצמתו 100 וכיוונו ימינה, כמתואר בתרשים משמאל.

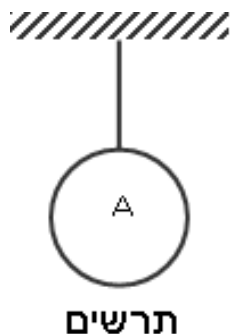


א- קבעו לכל אחד מארבעת הכדורים אם הוא נטען, ואם כן – מהו הסימן של המטען. נמקו את קביעותיכם.

פתרון:

- ▶ הכדורים A ו-B יטענו וכדורים C ו-D לא יטענו.
- ▶ מאחר ש-A ו-B הם מוליכים, האלקטרונים יכולים לעבור בהשפעת השדה החשמלי החיצוני מכדור B לכדור A (הפוך מכיוון השדה), כך שכדור A יטען במטען שלילי וכדור B יטען במטען חיובי.
- ▶ הכדורים C ו-D לא יטענו, משום שאין מעבר של חלקיקים נושאי המטען שלהם מהם או אליהם. בכדורים אלה ייווצר קיטוב.

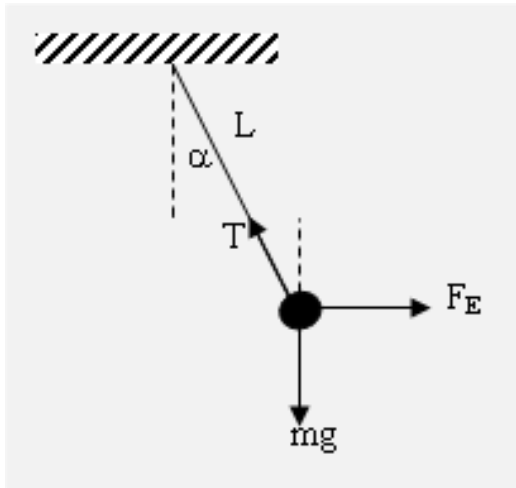
מוציאים את כדור A מהשדה החשמלי ותולים אותו על חוט מבודד מחוץ לשדה (תרשים משמאל). מוציאים מהשדה החשמלי גם את הכדורים B, C ו-D.



ב- תארו מה יקרה לכדור A כאשר יקרבו אליו בכל פעם את אחד הכדורים. האם הכדור A יימשך, ידחה או יישאר במקומו? הניחו כי מטען הכדורים לא השתנה. נמקו את תשובותיכם.

- ▶ כדורים A ו-B יימשכו זה לזה מאחר שהם טעונים במטען הפוך סימן.
- ▶ כדורים C ו-D יימשכו אל A בגלל הקיטוב שחל בהם.

מקרבים את כדור B לכדור A. כדור A סוטה, ולאחר מכן הוא מתייצב, כך שמרכזי הכדורים A ו-B הם באותו גובה, והמרחק ביניהם הוא 2cm. במצב זה נוצרת זווית של 5° בין החוט לאנך. מסת הכדור A היא $5gr$.



ג- מהו הערך של המטען החשמלי על פני כל אחד משני הכדורים A ו-B?
 במצב מנוחה, בהתאם לחוק הראשון של ניוטון: ◀

$$\sum F = 0$$

$$\sum F_y = 0 \Rightarrow T \cdot \cos 5^\circ = mg$$

$$\sum F_x = 0 \Rightarrow T \cdot \sin 5^\circ = \frac{k \cdot q^2}{r^2}$$

$$\frac{k \cdot q^2}{r^2} = \frac{mg \cdot \sin 5^\circ}{\cos 5^\circ}$$

$$q = \sqrt{\frac{m \cdot g \cdot \sin 5^\circ \cdot r^2}{k \cdot \cos 5^\circ}}$$

$$q = \sqrt{\frac{5 \cdot 10^{-3} \cdot 10 \cdot \sin 5^\circ \cdot (2 \cdot 10^{-2})^2}{9 \cdot 10^9 \cdot \cos 5^\circ}}$$

$$q = 1.4 \cdot 10^{-8} C$$