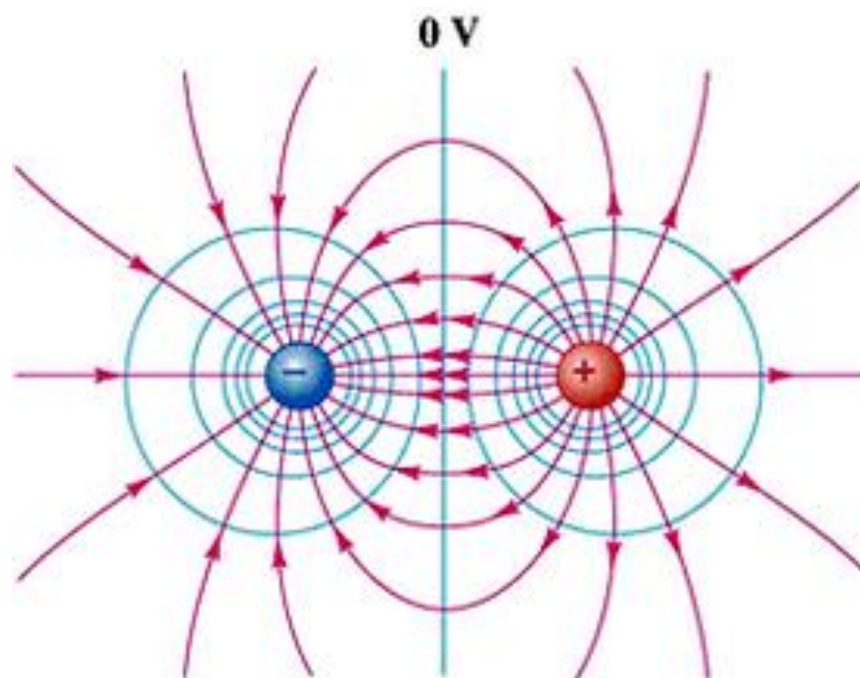


אלקטרודינמיקה מתח חשמלי



▶ ההפרש בין הפוטנציאלים של שתי נקודות נתונות נקרא **מתח חשמלי**. $V_{AB} = V_B - V_A$

▶ המתח החשמלי בין A ל-B הוא עבודת הכוח החיצוני הכרוכה בהעתקת יחידת מטען חיובי מ-A ל-B.

$$W = q \cdot V_{AB} = q \cdot (V_B - V_A)$$

▶ קו שווה-פוטנציאל מאופיין בכך שכל נקודותיו מצויות בפוטנציאל שווה, מכאן שהעתקת מטען לאורך קו שווה-פוטנציאל אינה כרוכה בביצוע עבודה.

▶ הכיוון של קו שדה בנקודה מסוימת, הנמצאת על קו שווה-פוטנציאל ניצב תמיד לקו שווה-פוטנציאל בנקודה הנדונה.

▶ בעת חיבור בין שני כדורים מוליכים שלפחות אחד מהם טעון יש מעבר מטענים מהכדור בעל הפוטנציאל הגבוה אל הכדור בעל הפוטנציאל הנמוך, עד לשוויון פוטנציאלים. המטען הכולל של הכדורים לפני חיבורם שווה למטען הכולל של הכדורים לאחר חיבורם.

▶ הארקה- חיבור גוף טעון אל כדור-הארץ באמצעות מוליך. במצב זה כל המטען שהיה על המוליך יעלם, וכתוצאה מכך הפוטנציאל של המוליך יהיה שווה בקירוב טוב לפוטנציאל של האדמה- אפס.

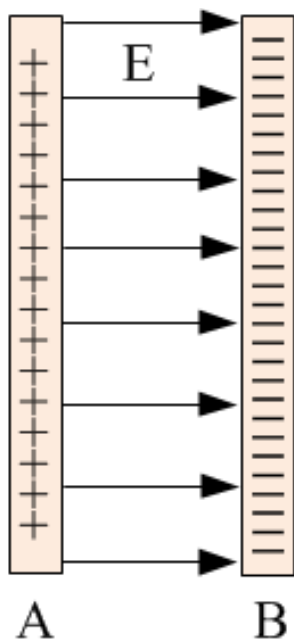
הפרש הפוטנציאלים בין שני לוחות טעונים הוא $100[V]$.

המערכת מצויה בריק. מטען הפרוטון הוא $1.6 \cdot 10^{-19}[C]$ ומסתו $1.67 \cdot 10^{-27}[kg]$.

א- מהי העבודה שמבצע השדה החשמלי על הפרוטון במעברו (ממנוחה) מ-A ל-B?

ב- מהי האנרגיה הקינטית של פרוטון רגע לפני פגיעתו בלוח B?

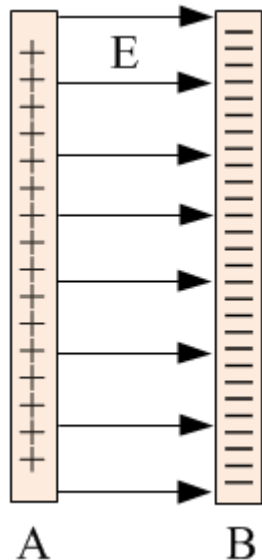
ג- מהי מהירותו של הפרוטון?



הפרש הפוטנציאלים בין שני לוחות טעונים הוא $100[V]$.
המערכת מצויה בריק. מטען הפרוטון הוא $1.6 \cdot 10^{-19}[C]$ ומסתו $1.67 \cdot 10^{-27}[kg]$.

א- מהי העבודה שמבצע השדה החשמלי על הפרוטון במעברו (ממנוחה) מ-A ל-B?

נחשב על פי הקשר בין העבודה שמבוצעת ע"י השדה למתח החשמלי:



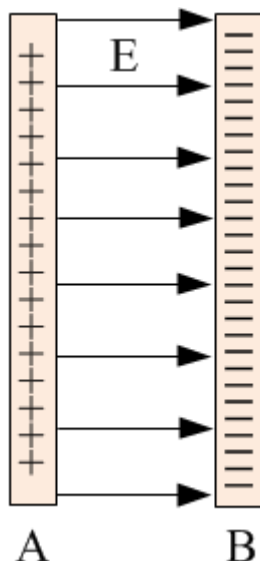
$$W_E = -q \cdot V_{AB} = -1.6 \cdot 10^{-19} \cdot (-100[V]) = 1.6 \cdot 10^{-17} [J]$$

ב- מהי האנרגיה הקינטית של פרוטון המשוחרר ממנוחה בלוח B רגע לפני פגיעתו בלוח A?

נשתמש בקשר:

$$W_E = -qV_{AB}$$

העבודה שמבצע השדה על הפרוטון בתנועתו מ-A ל-B גורמת לעליית האנרגיה הקינטית שלו. הואיל והכוח החשמלי הוא הכוח היחיד המבצע עבודה על הפרוטון (אנו מזניחים את כוח הכובד), כל העבודה הזו תורמת כולה לאנרגיה הקינטית של הפרוטון ומתקיים:



$$W_E = -qV_{AB} = E_k$$

$$1.6 \cdot 10^{-19} \cdot 100 = 1.6 \cdot 10^{-17} \text{ J}$$

ג- מהי מהירותו של הפרוטון?

◀ מתוך האנרגיה הקינטית שחושבה בסעיף הקודם:

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2$$

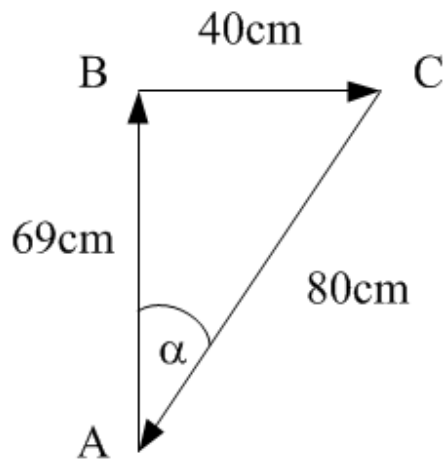
$$v = \sqrt{\frac{2E_k}{m}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1.6 \cdot 10^{-17}}{1.67 \cdot 10^{-27}}} = 138,425 \left[\frac{m}{s} \right] : 140 \left[\frac{km}{s} \right]$$

נתון שדה חשמלי קבוע $E=2000 \text{ [N/C]}$ ו-3 נקודות המצויות בו (ראו תרשים).

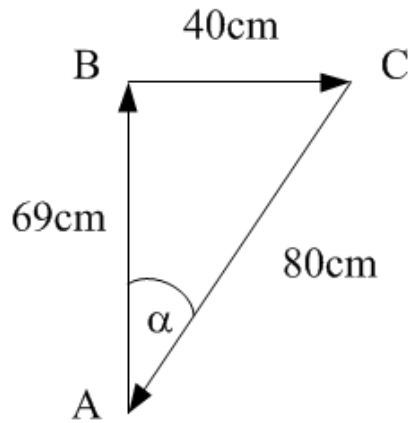
א- חשבו את V_{ab} , V_{bc} , V_{ca} והסבירו את תשובתכם בהקשר של עבודת כוח חיצוני הפועל על מטען חיובי.

ב- הסבירו את הקשר בין V_{AC} ל- V_{AB} .

ג- הראו כי העבודה הכוללת, הנדרשת להעביר מטען q מנקודה A לנקודה B ונקודה C ובחזרה שווה ל-0



$$E=2000 \text{ N/C}$$



נתון שדה חשמלי קבוע $E=2000 \text{ [N/C]}$ ו-3 נקודות המצויות בו.

א- חשבו את V_{ab} , V_{bc} , V_{ca} .

◀ נעזר בקשר: $E = -\frac{\Delta V}{x} \rightarrow \Delta V = -Ex$

◀ עבור V_{ab} נקבל: $V_{AB} = V_B - V_A = -2000 \cdot 0.69 = -1380 \text{ [V]}$

מכיוון שהשדה E הוא בכיוון המסלול AB, עבודת הכוח החיצוני היא שלילית.

◀ עבור V_{bc} נקבל: $V_{BC} = V_C - V_B = 0$

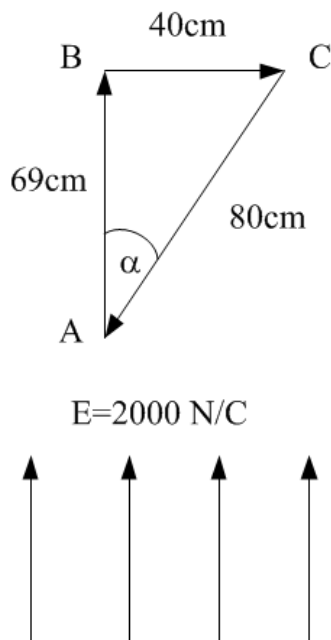
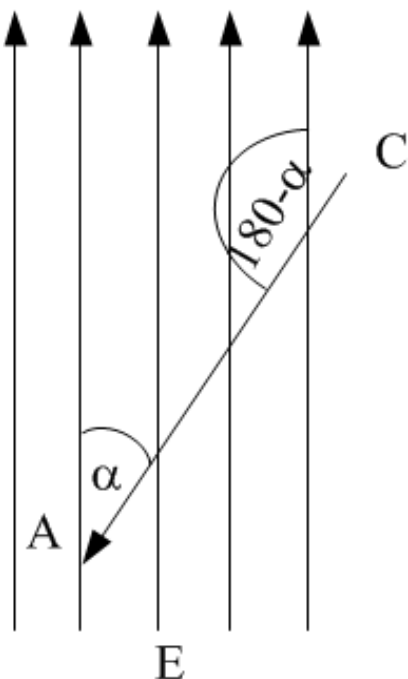
המסלול BC ניצב לקווי השדה, כלומר זהו קו שווה-פוטנציאל, ולכן עבודת הכוח החיצוני היא 0.

- במקרה של V_{ca} יש זווית בת $180^\circ - \alpha$ בין כיוון השדה לכיוון המסלול CA (ראו איור), ולכן יש להשתמש רק ברכיב השדה שלאורך המסלול. זהו הרכיב המשפיע על הבדל הפוטנציאלים בין הנקודות.
- נשתמש בקשר $\cos(180^\circ - \alpha) = -\cos(\alpha)$, ונקבל:

$$V_{CA} = V_A - V_C = -2000 \cdot \cos(180^\circ - \alpha) \cdot 0.8 = -2000 \cdot (-\cos \alpha) \cdot 0.8 =$$

$$= -2000 \cdot \left(-\frac{0.69}{0.8}\right) \cdot 0.8 = +1380[V]$$

- המסלול CA והשדה הם במגמות הפוכות, כלומר תזוזת המטען היא מהפוטנציאל הנמוך לגבוה, ולכן במקרה זה עבודת הכוח החיצוני היא חיובית.



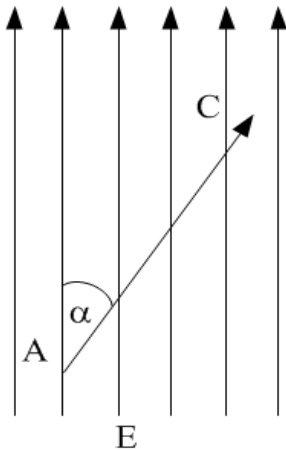
ב- הסבירו את הקשר בין המתח בין V_{AC} ל- V_{AB} .

◀ בסעיף הקודם קיבלנו כי:

$$V_{AB} = V_B - V_A = -2000 \cdot 0.69 = -1380[V]$$

◀ כעת נחשב את V_{AC}

◀ במקרה של V_{AC} יש זווית α בין כיוון השדה לכיוון המסלול AC (ראו איור), ולכן יש להשתמש רק ברכיב השדה שבכיוון המסלול.



$$\begin{aligned} V_{AC} &= V_C - V_A = -2000 \cdot \cos(\alpha) \cdot 0.8 = \\ &= -2000 \cdot \left(\frac{0.69}{0.8}\right) \cdot 0.8 = -1380[V] \end{aligned}$$

◀ קיבלנו כי $V_{AB} = V_{AC}$.

◀ הסיבה היא שהנקודות C ו- B מצויות על קו שווה פוטנציאל, כלומר לשתייהן אותו הפוטנציאל. לכן הפרש הפוטנציאלים 0 (המתח) בין נקודה A לנקודות אלה שווה.

ג- הראו כי העבודה הנדרשת להעביר מטען q מנקודה A לנקודה B לנקודה C ובחזרה שווה ל-0.
 נשתמש בקשר: ◀

$$W_{m \rightarrow n} = qV_{mn}$$

$$W_{A \rightarrow B} = qV_{AB} = -1380 \cdot q$$

◀ ונקבל:

$$W_{B \rightarrow C} = qV_{BC} = 0 \cdot q = 0$$

$$W_{C \rightarrow A} = qV_{CA} = +1380 \cdot q$$

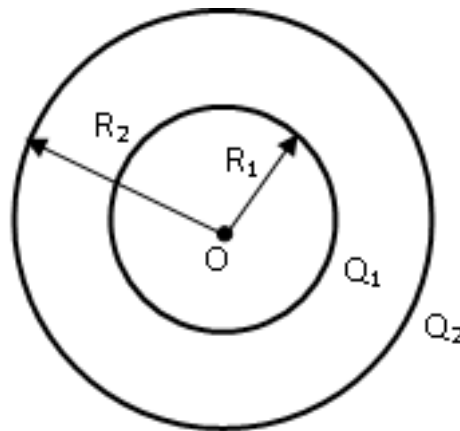
◀ כלומר:

$$W_{A \rightarrow C} = qV_{AB} = -1380 \cdot q + 0 + 1380 \cdot q = 0$$

$$W_{C \rightarrow A} = +1380 \cdot q + 0 + 1380 \cdot q = 0$$

$$W_{A \rightarrow C} = W_{C \rightarrow A} = 0$$

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



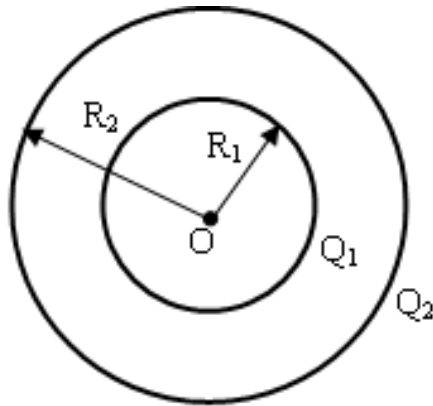
הקליפה הפנימית טעונה במטען חשמלי חיובי Q_1 , והקליפה חיצונית טעונה במטען חשמלי חיובי Q_2 . שתי קליפות עשויות מחומר מוליך.

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

(1) הנקודה O .

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

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



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

$$E_0 = 0$$

(1) השדה בתוך קליפה טעונה הוא 0:

$$E_1 = \frac{k \cdot Q_1}{R_1^2}$$

(2) התרומה היא רק מהכדור הפנימי:

$$E_2 = \frac{k \cdot Q_1}{R_2^2} + \frac{k \cdot Q_2}{R_2^2}$$

(3) התרומה היא משני הכדורים:

ב. בטאו באמצעות נתוני השאלה את הפוטנציאל החשמלי הכולל, ששתי הקליפות יוצרות בכל אחת משלוש הנקודות (1)-(3):

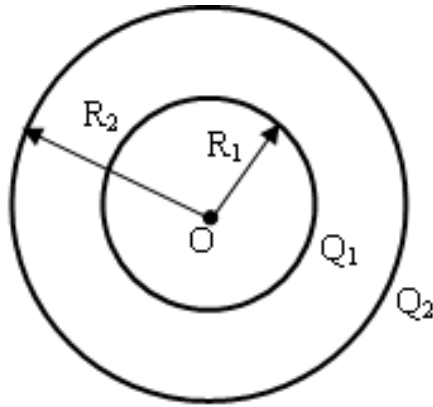
(1) הנקודה O.

(2) נקודה על פני הקליפה הפנימית.

(3) נקודה על פני הקליפה החיצונית.

ג. על איזה משתי הקליפות הפוטנציאל החשמלי גדול יותר? נמקו.

ד. מחברים את שתי הקליפות באמצעות תיל מוליך דק שהתנגדותו זניחה, ולכן חלקיקים טעונים יכולים לעבור ביניהן. בטאו באמצעות נתוני השאלה את המטען החשמלי על כל אחת משתי הקליפות לאחר שנפסק הזרם בתיל.



ב. בטאו באמצעות נתוני השאלה את הפוטנציאל החשמלי הכולל, ששתי הקליפות יוצרות בכל אחת משלוש הנקודות (1)-(3):

הפוטנציאל בתוך קליפה טעונה הוא קבוע ושווה לזה שעל פניו, ומחוץ לקליפה הפוטנציאל מתקבל כאילו כל המטען מרוכז במרכז הקליפה:

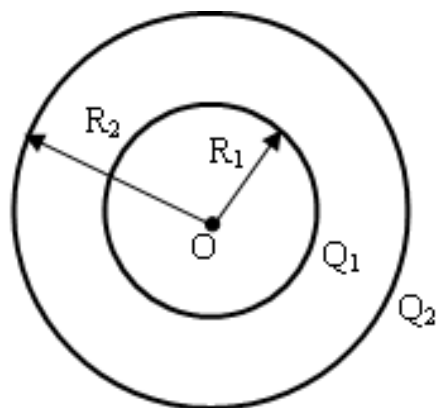
$$V_0 = \frac{k \cdot Q_1}{R_1} + \frac{k \cdot Q_2}{R_2}$$

$$V_1 = \frac{k \cdot Q_1}{R_1} + \frac{k \cdot Q_2}{R_2}$$

$$V_2 = \frac{k \cdot Q_1}{R_2} + \frac{k \cdot Q_2}{R_2}$$

ג. על איזה משתי הקליפות הפוטנציאל החשמלי גדול יותר? נמקו.

ד. מחברים את שתי הקליפות באמצעות תיל מוליך דק שהתנגדותו זניחה, ולכן חלקיקים טעונים יכולים לעבור ביניהן. בטאו באמצעות נתוני השאלה את המטען החשמלי על כל אחת משתי הקליפות לאחר שנפסק הזרם בתיל.



ג. הפוטנציאל של הקליפה הפנימית גדול מזה של הקליפה החיצונית. על פי התשובה לסעיף ב':

$$V_1 > V_2 \text{ כי } R_2 > R_1$$

ד. לאחר שנפסק הזרם בתיל, כל המטען יעבור לקליפה החיצונית. מטען הקליפה הפנימית יהיה אפס, ומטען הקליפה החיצונית יהיה: $Q_2 + Q_1$.

דרך אחרת : שוויון פוטנציאלים לאחר חיבור הקליפות: $V'_2 = V'_1$

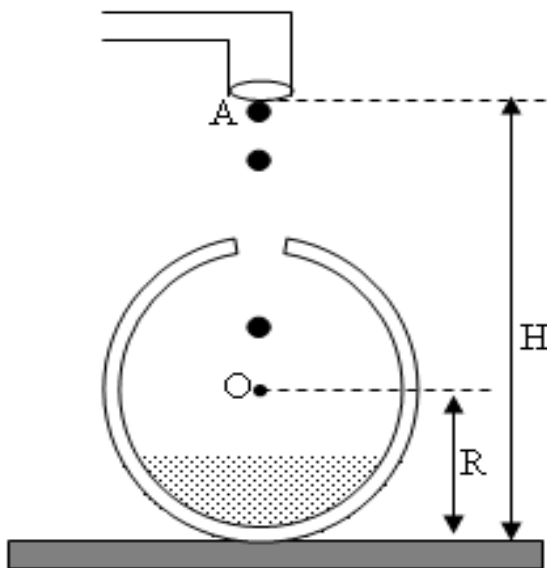
$$\frac{k \cdot Q'_1}{R_1} + \frac{k \cdot Q'_2}{R_2} = \frac{k \cdot Q'_1}{R_2} + \frac{k \cdot Q'_2}{R_2}$$

$$\frac{Q'_1}{R_1} = \frac{Q'_1}{R_2} \Rightarrow Q'_1 \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) = 0$$

$$Q'_1 = 0$$

$$Q'_1 + Q'_2 = Q_1 + Q_2 \rightarrow Q'_2 = Q_1 + Q_2$$

בתרשים מתוארת קליפה כדורית מוליכה ומבודדת שבה פתח קטן. טיפות בעלות מטען חשמלי חיובי ניתקות מצינורית, נופלות לתוך הקליפה, וכל מטען עובר לקליפה. רדיוס הקליפה הוא R , ופתח הצינורית נמצא בגובה H מעל תחתית הקליפה.



- א. לגבי הרגע שבו מטען הקליפה הוא Q , בטא עבור כל אחת מהנקודות A ו-O (ראה תרשים) את:
- (1) השדה החשמלי (גודל וכיוון) הנוצר על-ידי הקליפה הטעונה (בלבד).
 - (2) הפוטנציאל החשמלי הנוצר על-ידי הקליפה הטעונה (בלבד). הפוטנציאל באינסוף נבחר כ-0.

כל טיפה היא בעלת מסה m ומטען q , ועל הטיפות פועלים רק כוח הכובד והכוח האלקטרוסטטי. הזניחו את הכוחות האלקטרוסטטיים שבין הטיפות.

א (1) השדה החשמלי ב-A הוא כתוצאה מהמטען על הקליפה שהוא כמו השדה של מטען נקודתי במרכז הקליפה. מכיוון שהמטען הוא חיובי כיוונו כלפי מעלה.

$$E_A = \frac{k \cdot Q}{(H - R)^2}$$

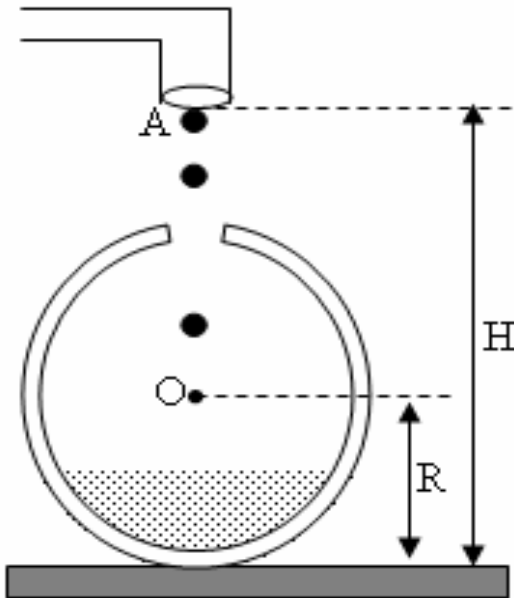
השדה החשמלי בנקודה O שווה לאפס, כי הנקודה נמצאת בתוך קליפה כדורית.

א (2) הפוטנציאל ב-A הוא כמו הפוטנציאל של מטען נקודתי במרכז הקליפה:

$$V_A = \frac{k \cdot Q}{(H - R)}$$

הפוטנציאל ב-O שווה לפוטנציאל של שפת הקליפה:

$$V_0 = \frac{k \cdot Q}{R}$$



- ב. בטאו באמצעות נתוני השאלה את המטען Q של הקליפה, שעבורו טיפה בנקודה A תהיה בשיווי-משקל.
- ג. בטאו באמצעות נתוני השאלה את העבודה שנעשתה נגד הכוחות החשמליים בטעינת הקליפה הכדורית למטען Q שבסעיף ב.
- ד. מהו מקור האנרגיה לעבודה שבסעיף ג?

ב. הטיפה בשיווי המשקל כאשר כוח הכובד שווה בגודלו לכוח הדחייה החשמלי:

$$mg = \frac{k \cdot Q \cdot q}{(H - R)^2} \Rightarrow Q = \frac{mg \cdot (H - R)^2}{k \cdot q}$$

ג. העבודה שנעשתה נגד הכוחות החשמליים משתנה לינארית מ-0 ועד לערך המקסימלי, ולכן בסך הכל ניקח את הערך הממוצע שלה:

$$W = \frac{V \cdot Q}{2}$$

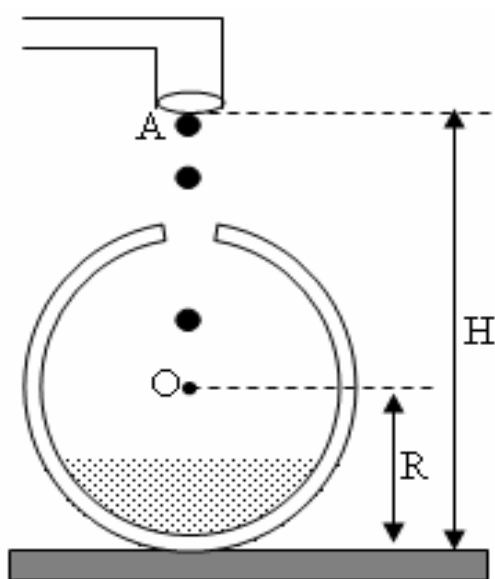
$$V = \frac{k \cdot Q}{R}$$

$$W = \frac{k \cdot Q^2}{2R}$$

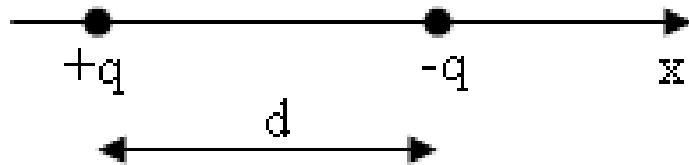
ולאחר הצבת Q מסעיף ב', מתקבל:

$$W = \frac{m^2 g^2 \cdot (H - R)^4}{2 \cdot R \cdot k \cdot q^2}$$

ד. מקור האנרגיה הוא האנרגיה הפוטנציאלית הכובדית של הטיפות.



שני מטענים $+q$ ו- $-q$ נמצאים על ציר ה- x , והמרחק ביניהם הוא d (ראה תרשים א').



תרשים א'

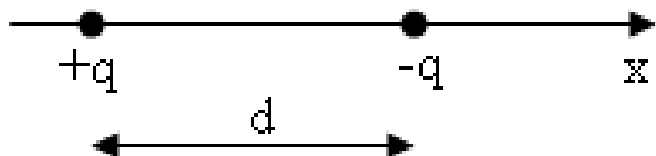
א. האם קיימת נקודה לאורך ציר ה- x שבה:

(1) השדה החשמלי מתאפס? הסבירו.

(2) הפוטנציאל החשמלי מתאפס? הסבירו.

בתשובותיכם התייחסו לציר ה- x כולו (הקטע שבין שני המטענים והתחום שמחוץ לקטע זה).

ב. מהי העבודה שיש לעשות, כדי להגדיל את המרחק בין שני המטעים ל- $2d$?



א. האם קיימת נקודה לאורך ציר ה- x שבה:

(1) השדה החשמלי מתאפס? הסבירו.

(2) הפוטנציאל החשמלי מתאפס? הסבירו.

(1) לא. משמאל למטען ומימין למטען השדות אמנם מנוגדים אך שונים בעצמתם, כי המרחק משני המטענים שונה.

(2) כן. בנקודת האמצע בין שני המטענים הפוטנציאלים שווים בערכם המוחלט ושונים בסימנם:

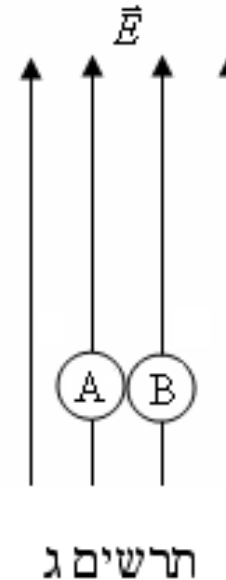
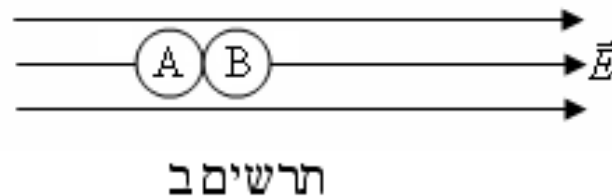
$$V = \frac{kq}{r}$$

ב. מהי העבודה שיש לעשות, כדי להגדיל את המרחק בין שני המטעים ל- $2d$?
העבודה שווה להפרש האנרגיות הפוטנציאליות החשמליות:

$$W = \Delta E_p = \frac{k \cdot q \cdot (-q)}{2d} - \frac{k \cdot q \cdot (-q)}{d} = \frac{k \cdot q^2}{2d}$$

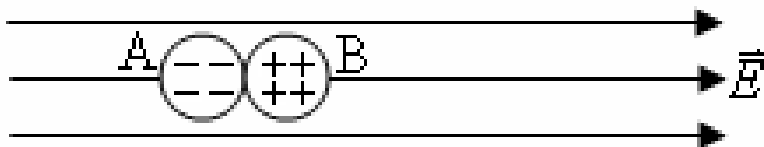
ג. (1) מכניסים שני כדורים מוליכים שאינם טעונים, A ו-B, הנוגעים זה בזה, לתוך שדה חשמלי אחיד, כמתואר בתרשים ב. מפרידים את הכדורים זה מזה בתוך השדה החשמלי. האם לאחר ההפרדה הכדורים טעונים? אם לא – הסבירו. אם כן – מהו סימן המטען של כדור A, ומהו סימן המטען של כדור B? הסבירו.

(2) ענו על סעיף (1), כאשר השדה החשמלי הוא בכיוון המתואר בתרשים ג.



ג. (1) מכניסים שני כדורים מוליכים שאינם טעונים, A ו-B, הנוגעים זה בזה, לתוך שדה חשמלי אחיד, כמתואר בתרשים ב. מפרידים את הכדורים זה מזה בתוך השדה החשמלי. האם לאחר ההפרדה הכדורים טעונים? אם לא – הסבירו. אם כן – מהו סימן המטען של כדור A, ומהו סימן המטען של כדור B? הסבירו.

כן. מכיוון שכיוון השדה החשמלי הוא ימינה, תתבצע הפרדת מטענים על ידי השדה E. הכדור B יהיה טעון במטען חיובי, והכדור A יהיה טעון במטען שלילי.



(2) ענו על סעיף (1), כאשר השדה החשמלי הוא בכיוון המתואר בתרשים ג.

לא. כאשר הכדורים נמצאים זה לצד זה המטענים מופרדים בתוך כל כדור, אך אין מעבר של מטען מכדור אחד למשנהו כי המטען הכולל של כל כדור הוא 0. לכן, גם לאחר ההפרדה המטען הכולל של כל כדור יישאר שווה לאפס.

