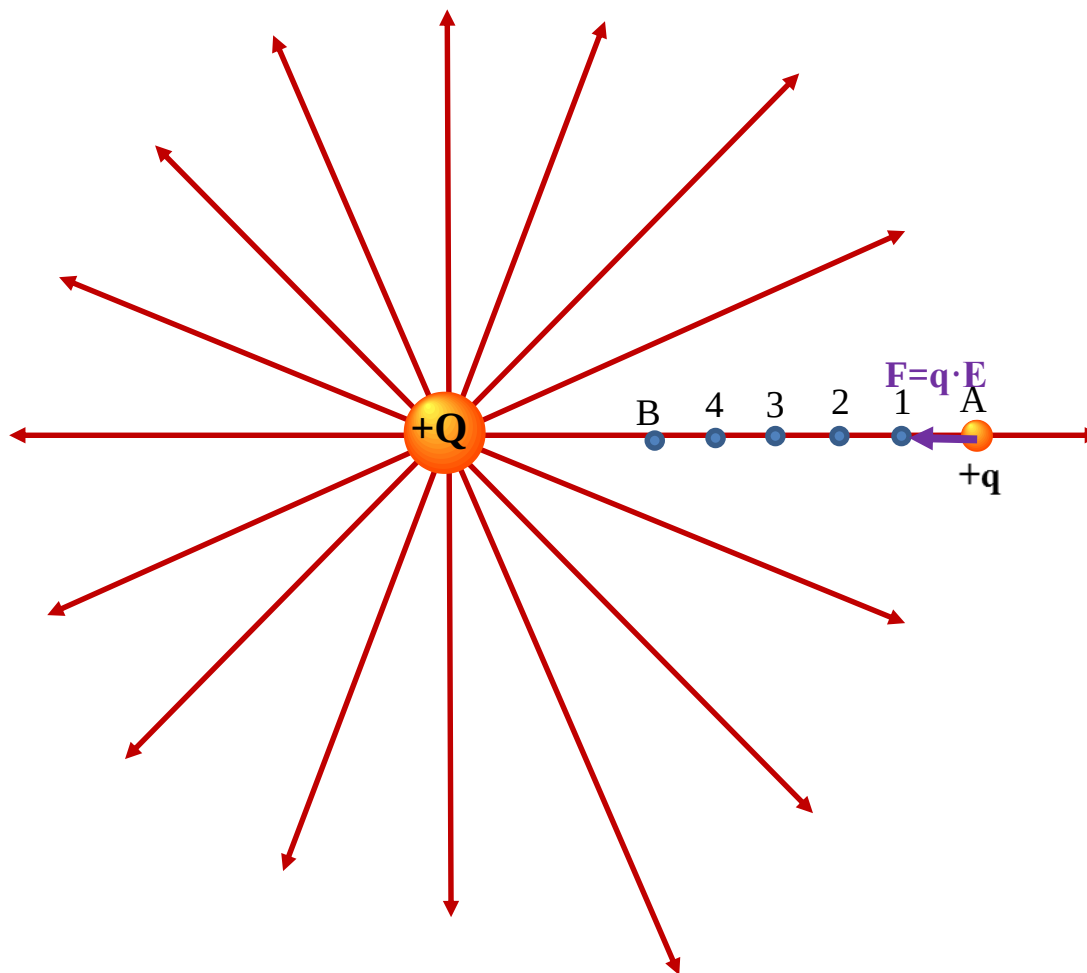


אנרגיה פוטנציאלית חשמלית



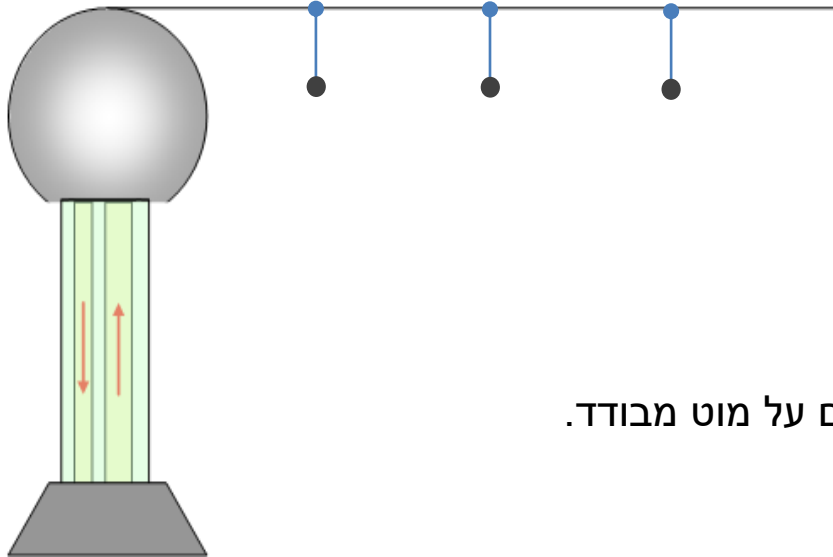
- ◀ הכוח החשמלי - כוח משמר
 - ◀ אנרגיה פוטנציאלית חשמלית
 - ◀ הפוטנציאל החשמלי:
- 1) הפוטנציאל הנוצר על ידי מטען נקודתי
 - 2) הפוטנציאל הנוצר על ידי מערכת מטענים

◀ בפרק הקודם הגדרנו את העוצמה של שדה חשמלי בנקודה מסוימת במרחב.

◀ הגדרנו את השדה ככוח החשמלי הפועל באותה נקודה ליחידת מטען חשמלי המונחת שם (יחידתו ניוטון לקולון). כמו כן ייחסנו כיוון לעוצמת השדה החשמלי, והוא כיוון הכוח שיפעל על מטען בוחן חיובי.

◀ בשיעור זה נכיר תכונה חשמלית נוספת בכל נקודה במרחב סביב מטען חשמלי: אנרגיה חשמלית ופוטנציאל חשמלי.

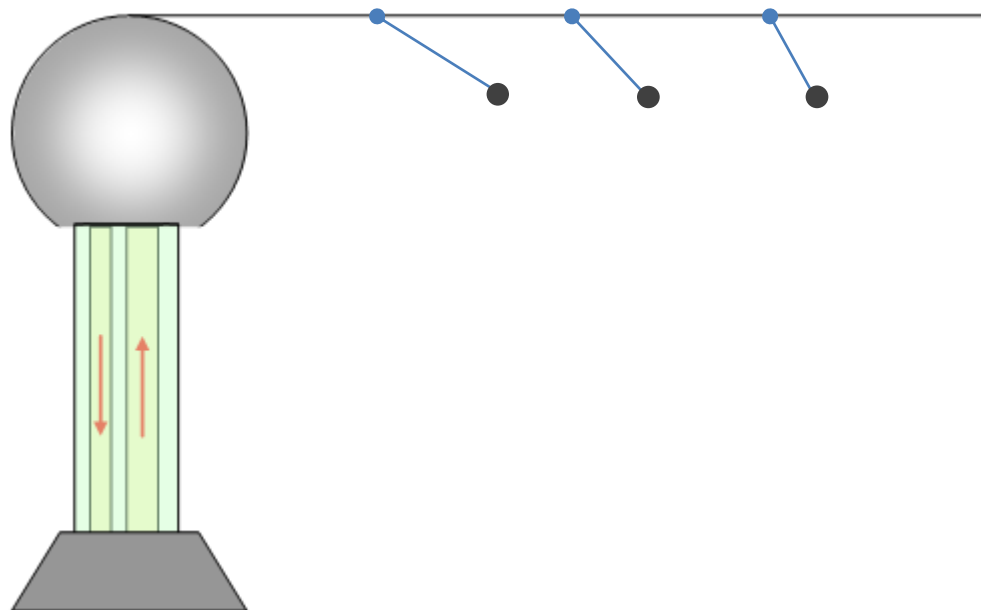
הניסוי הבא יראה שבנקודות השדה החשמלי פועל כוח חשמלי על מטען הנמצא שם.



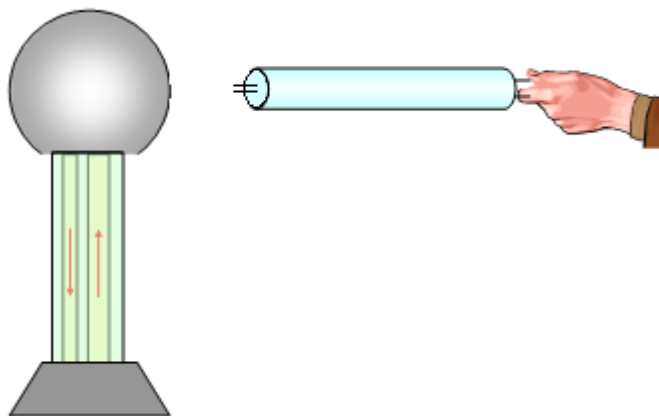
כדורי פחם קטנים הקשורים לחוט, תלויים במרחקים שונים על מוט מבודד.
מה יקרה כשיופעל המכשיר שיוצר שדה חשמלי במרחב?

◀ כדורי הפחם סוטים מהאנך בזוויות שונות כתוצאה מהשפעת השדה החשמלי.

◀ זווית הסטייה השונה של החוטים מעידה כי בנקודות שונות של המרחב פועל כוח שונה, כלומר- עוצמת השדה היא שונה.



בנוסף לתכונת עוצמת השדה ניתן לראות שבכל נקודה במרחב סביב המטען יש גם אנרגיה. נבדוק האם נורת פלואורסצנט תדלק כאשר היא תמצא בקרבת גוף טעון.



הנורה תידלק ותכבה כמה פעמים, אף ללא מגע עם הגוף הטעון.

(לדוגמא - https://www.youtube.com/watch?feature=player_detailpage&v=li1UifBoTb0)

האנרגיה של האור והחום הנפלטים מהנורה מקורה באנרגיה הקיימת בשדה החשמלי.

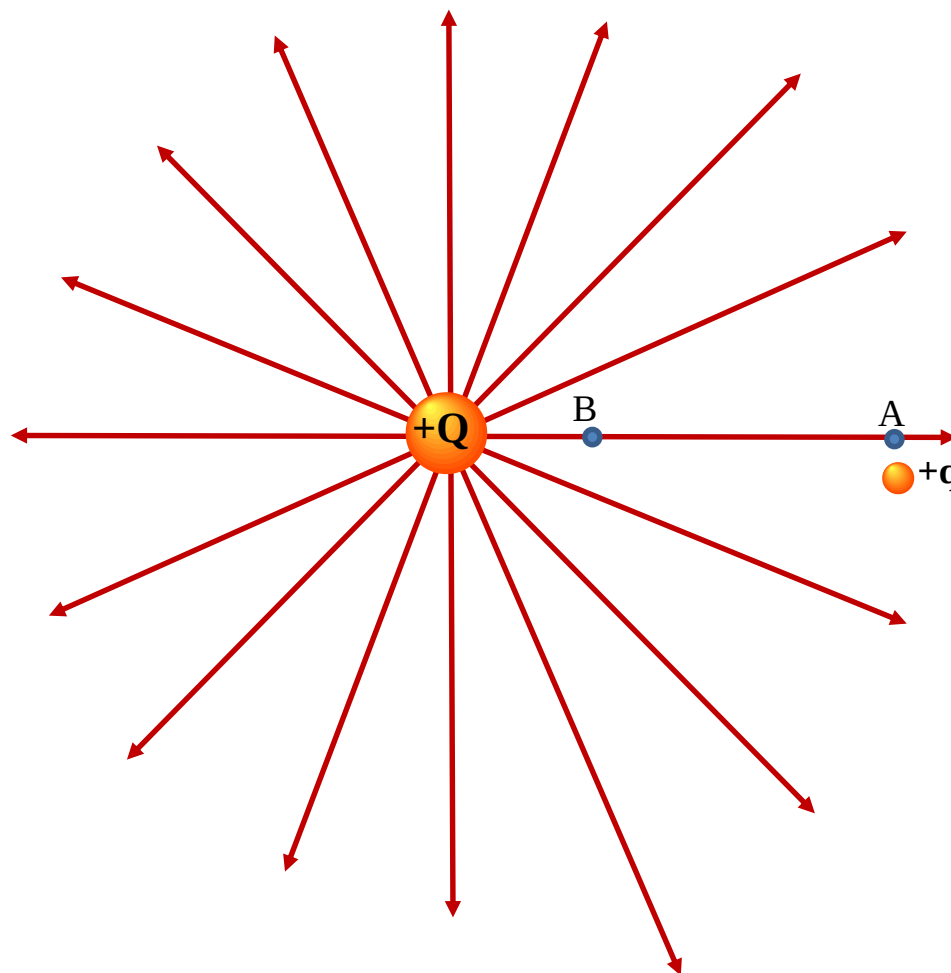
הדגמה זו מראה שיש אנרגיה, שתקרא חשמלית, לא רק בגוף טעון גם במרחב סביב גוף טעון, ללא

מגע אתו.

- ▶ לעיתים השדה נוצר על ידי מטענים רבים וחישוב השדה כשקול ווקטורי מסובך. לכן נחפש גודל פיזיקלי אחר, הפעם סקלרי, שגם הוא כמו השדה, יכול לתאר את המצב החשמלי של כל נקודה במרחב.
- ▶ בלימודי המכניקה נוכחנו לדעת שלעיתים קרובות לניתוח מצבים ולהבנת תופעות טבע, נוח להשתמש באנרגיה (גודל סקלרי) ולא בכוח (גודל ווקטורי). כך נעשה גם בחשמל.
- ▶ נשתמש באנרגיה חשמלית במקום בעוצמת שדה חשמלי. השדה החשמלי אחראי לקיומו של זרם חשמלי במעגלים חשמליים. אך כדי לחשב את הזרם נוח יותר להשתמש במושג **מתח חשמלי** (אנרגיה חשמלית), כפי שנראה בפרק הבא.
- ▶ כדי להגדיר אנרגיה חשמלית ופוטנציאל חשמלי, נדון תחילה בעבודה הנעשית על מטען בשדה חשמלי, כמו שדנו באנרגיה פוטנציאלית כובדית במכניקה.

עבודת כוח חיצוני בהעתקת מטען בין 2 נק' כלשהן (1)

- ▶ לפנינו שדה חשמלי הנוצר על ידי מטען נקודתי חיובי $+Q$. מטען בוחן קטן וחיובי $+q$ נמצא בנקודה A.
- ▶ מה עבודת הכוח החיצוני כשהמטען $+q$ מועתק, כנגד הכוח החשמלי, מנקודה A לנקודה B אחרת על קו שדה אחד?



לנקודת ההתחלה, ממנה מתחילים בביצוע ההעתקה נקרא **נקודת ייחוס**.

ניתן לאפיין את המצב החשמלי של כל נקודה במרחב על ידי **העבודה הכרוכה בהעתקת יחידת מטען**

מנקודת הייחוס עד אותה נקודה.

כאשר דנים בשדה חשמלי, הנוצר על ידי מטענים בודדים נחים, נוהגים לבחור את נקודת הייחוס בנקודה

בה ניתן להניח כי עוצמת השדה החשמלי שווה לאפס. נקודה זו רחוקה מאוד מהמטענים היוצרים את

השדה (למעשה באינסוף).

$$r_A \rightarrow (\infty)$$

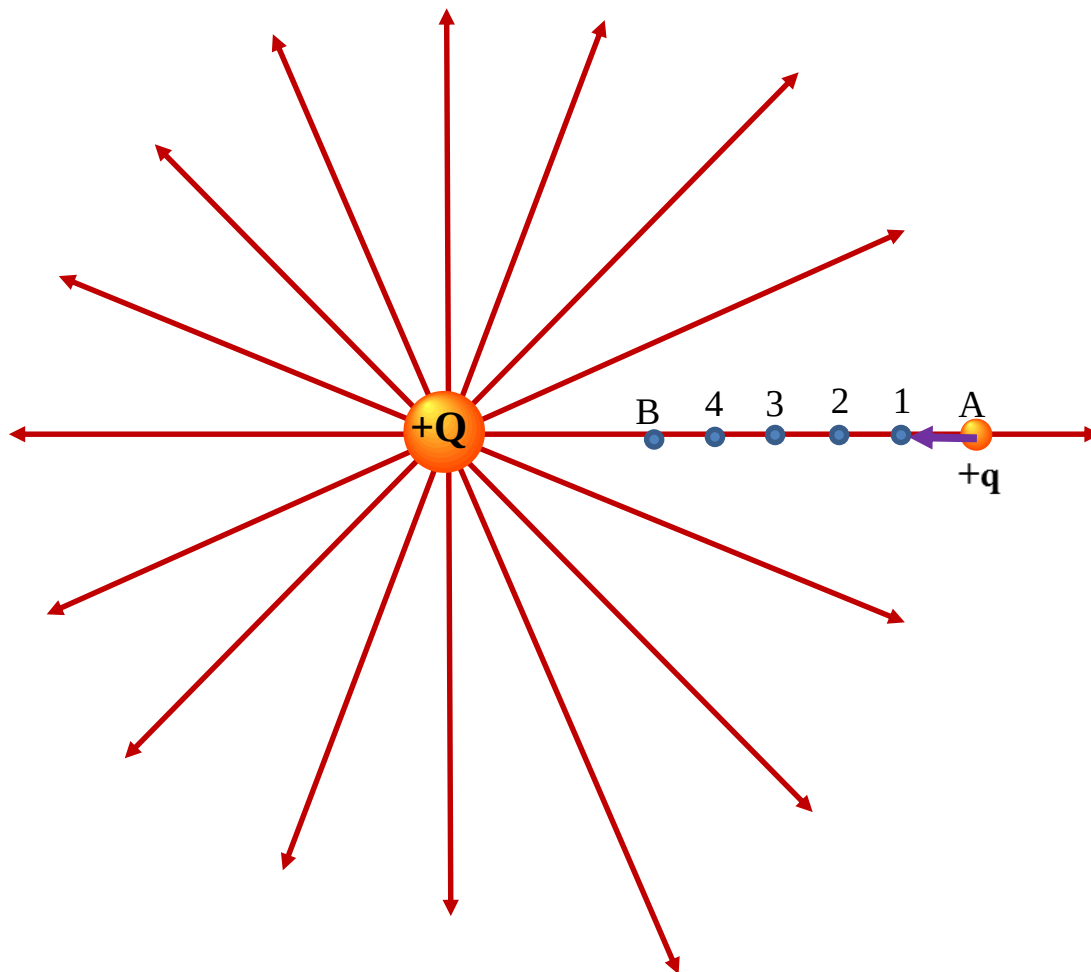
$$E_{(\infty)} = 0$$

עבודת כוח חיצוני בהעתקת מטען בין 2 נקודות (2)

נחלק את המסלול למספר העתקים קטנים וישרים כגון: $A \leftarrow 1$, $2 \leftarrow 1$ וכדומה, הקרובים מאוד זה לזה, כך שההפרש בין העוצמות של השדות קטן מאוד, כך שניתן להניח שבכל קטע השדה משתנה באופן ליניארי. נניח שההעתקה מתבצעת ללא שינוי בגודל המהירות.

$$W_{F(EX)} + W_{F(E)} = \Delta E_k = 0$$

$$W_{F(EX)} = -W_{F(E)}$$



עבודת כוח חיצוני בהעתקת מטען בין 2 נקודות (3)

◀ לאורכו של ההעתק הראשון, $a \leftarrow 1$ פועל על מטען הבוחן $+q$ כוח חיצוני שגודלו $q \cdot E$ בכיוונו של Δx .

◀ לכן העבודה של הכוח החיצוני היא חיובית ונתונה בביטוי:

$$\Delta W_{A \rightarrow 1} = qE\Delta x$$

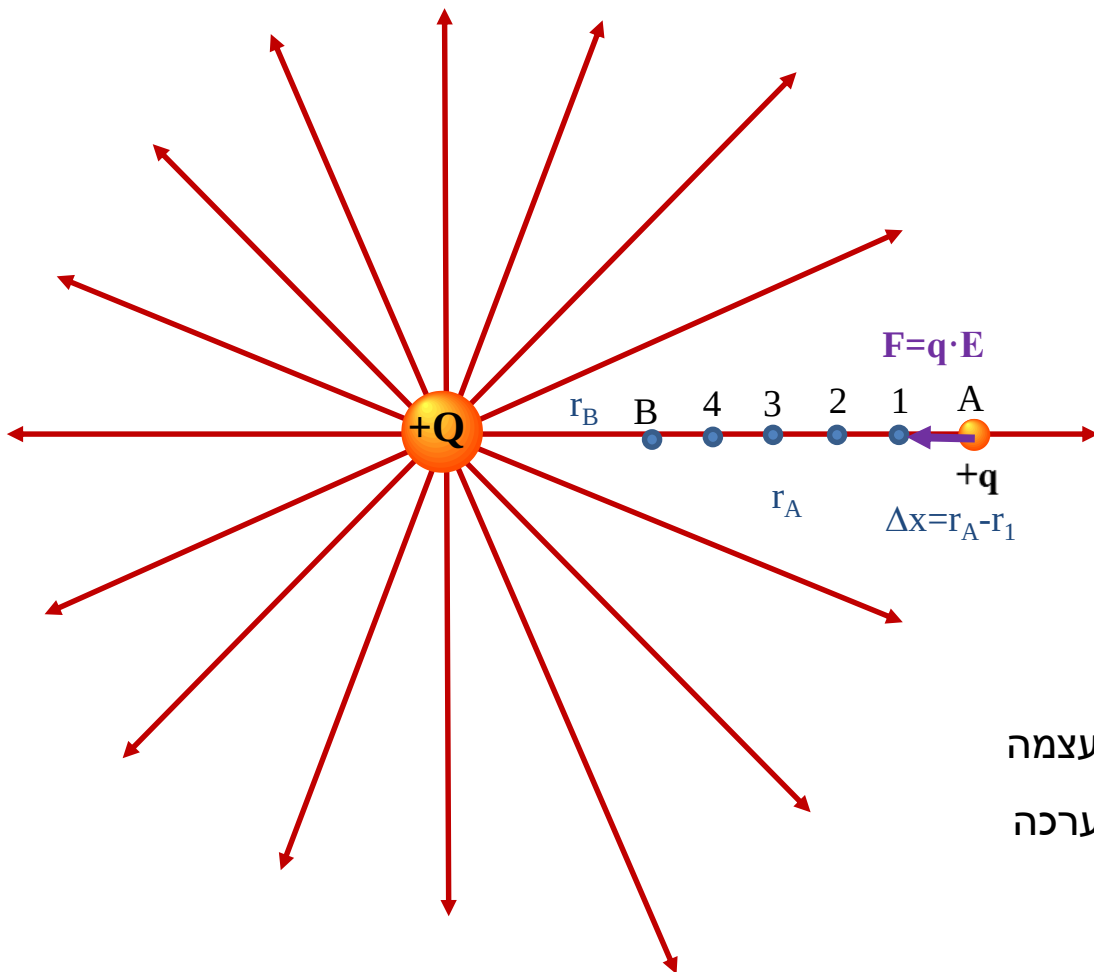
◀ במעבר מן הנקודה A לנקודה 1,

עצמת השדה משתנה מן הערך:

$$E_A = k \frac{Q}{r_A^2}$$

עד לערך:

$$E_1 = k \frac{Q}{r_1^2}$$



מאחר והנקודות a ו-1 קרובות מאוד זו לזו, ההפרש בין העוצמות קטן מאוד, ובמקום העצמה המשתנה של השדה אנו רשאים לקחת את ערכה הממוצע.

עבודת כוח חיצוני בהעתקת מטען בין 2 נקודות (4א)

$$\bar{E} = \frac{E_A + E_1}{2} = \frac{k \frac{Q}{r_A^2} + k \frac{Q}{r_1^2}}{2} = k \frac{Q}{2} \left[\frac{1}{r_A^2} + \frac{1}{r_1^2} \right] = k \frac{Q}{2} \left[\frac{r_1^2 + r_A^2}{r_A^2 \cdot r_1^2} \right]$$

$$\bar{E} = k \frac{Q}{2} \left[\frac{(r_A - r_1)^2 + 2r_A r_1}{r_A^2 \cdot r_1^2} \right]$$

◀ מכיוון שהנקודות A,1 קרובות מאד זו לזו מתקיים: $(r_A - r_1)^2 \rightarrow 0$

$$\bar{E} = k \frac{Q}{2} \left[\frac{2r_A r_1}{r_A^2 \cdot r_1^2} \right] = k \frac{Q}{r_A r_1}$$

◀ ראינו ש: $\Delta W = q\bar{E}\Delta x$

◀ נציב את הקשר: $\Delta x = r_A - r_1$ ונקבל:

$$\Delta W_{A \rightarrow 1} = k \frac{qQ}{r_A r_1} (r_A - r_1)$$

$$\Delta W_{A \rightarrow 1} = kqQ \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_A} \right)$$

עבודת כוח חיצוני בהעתקת מטען בין 2 נקודות (ב4)

◀ באותו אופן נוכל לחשב את העבודה בין כל שתי נקודות:

$$\Delta W_{1 \rightarrow 2} = kqQ \left(\frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_1} \right)$$

$$\Delta W_{2 \rightarrow 3} = kqQ \left(\frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_2} \right)$$

$$\Delta W_{3 \rightarrow 4} = kqQ \left(\frac{1}{r_4} - \frac{1}{r_3} \right)$$

$$\Delta W_{4 \rightarrow B} = kqQ \left(\frac{1}{r_B} - \frac{1}{r_4} \right)$$

◀ מחיבור כל המשוואות הנ"ל נקבל באגף השמאלי את העבודה הכוללת של הכוח החיצוני בהביאו את

המטען q מ-A ל-B:

$$\Delta W_{A \rightarrow B} = kqQ \left(\frac{1}{r_B} - \frac{1}{r_A} \right)$$

מניתוח המקרה ניתן להגיע למסקנה הבאה:

העבודה שמבצע הכוח החיצוני כנגד הכוח החשמלי בשדה חשמלי על מטען חשמלי חיובי, בעת העתקתו מנקודה שרירותית A לנקודה שרירותית אחרת B, הנמצאת על אותו קו שדה, אינה תלויה במסלול אלא רק בנקודות ההתחלה והסיום.

$$\Delta W_{A \rightarrow B} = kqQ \left(\frac{1}{r_B} - \frac{1}{r_A} \right)$$

כזכור, כל כוח שעבודה כנגדו אינה תלויה במסלול נקרא בשם **כוח משמר**. מכאן נסיק:

הכוח החשמלי הוא כוח משמר, ולכן ניתן להגדיר לו אנרגיה פוטנציאלית חשמלית.

❖ ניתן להראות שאם המטען q היה מועתק מנקודה שרירותית A לנקודה שרירותית אחרת B, שלא נמצאת על אותו קו שדה עדיין היינו מגיעים לאותה התוצאה, כי ניתן לפרק את הכוח לרכיב משיק למסלול שמבצע עבודה, ולרכיב אנכי לו, שאינו מבצע עבודה.

בדומה למה שעשינו במקרה של אנרגיה פוטנציאלית כובדית, נגדיר:

אנרגיה פוטנציאלית חשמלית (מסומנת U_E)-

האנרגיה, הנרכשת על ידי המערכת כתוצאה מהעבודה החיובית הנעשית על מטען q המועבר

מאינסוף למרחק r ממטען אחר Q על ידי כוח חיצוני.

$$U_E = k \frac{Q \cdot q}{r}$$

▶ ביטוי זה מתאר את האנרגיה הפוטנציאלית החשמלית **האצורה בתוך המערכת**. שמשמעותה היא:

העבודה הדרושה **ליצור** את המערכת, כלומר, העבודה הנדרשת כדי להביא את המטענים ממצב בו הם במרחק רב (אינסוף) למרחק r זה מזה.

▶ כאשר המטענים בעלי סימן זהה האנרגיה חיובית, וכאשר המטענים בעלי סימן שונה האנרגיה שלילית.

◀ השינוי באנרגיה הפוטנציאלית החשמלית בין שתי נקודות בשדה הוא:

$$\Delta U_E = U_{E_B} - U_{E_A}$$

◀ לכן, עבודת הכוח החיצוני:

$$\Delta W_{A \rightarrow B} = kqQ\left(\frac{1}{r_B} - \frac{1}{r_A}\right) = U_{E_B} - U_{E_A}$$

נזכיר כי עבודת הכוח החשמלי שווה בגודלה והפוכה בסימנה לעבודת הכוח החיצוני.

לכן, בכל מקרה בו מופיע ביטוי לעבודת הכוח החשמלי, נוכל להחליפו בערך השלילי של הפרש האנרגיות הפוטנציאליות.

$$W_{F_E A \rightarrow B} = -\Delta U_E$$

נתונים שני מטענים נקודתיים: $q_1 = +4 \cdot 10^{-6} [C]$, $q_2 = -3 \cdot 10^{-3} [C]$.



א. מהי האנרגיה הפוטנציאלית החשמלית של מערכת המטענים ?

ב. הסבירו את משמעות התוצאה שקבלתם.

א.



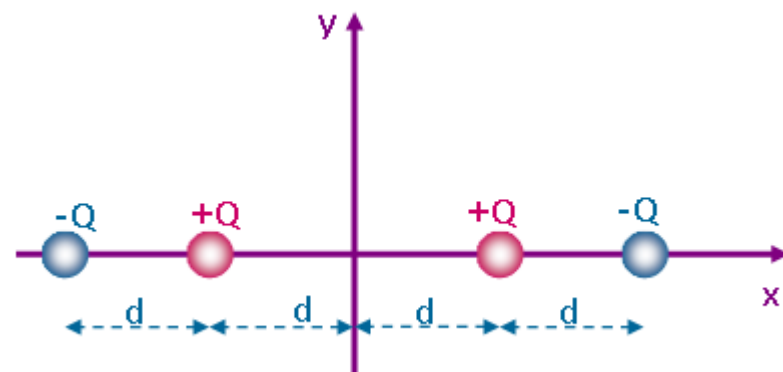
$$U_E = k \frac{Q \cdot q}{r} = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{4 \cdot 10^{-6} \cdot (-3 \cdot 10^{-3})}{0.05} = -2.16 [kJ]$$

ב. יש להשקיע עבודה של $2.16 [kJ]$ על ידי כוח חיצוני בכדי להעביר את המטענים ממצבם הנוכחי למרחק אינסופי זה מזה.

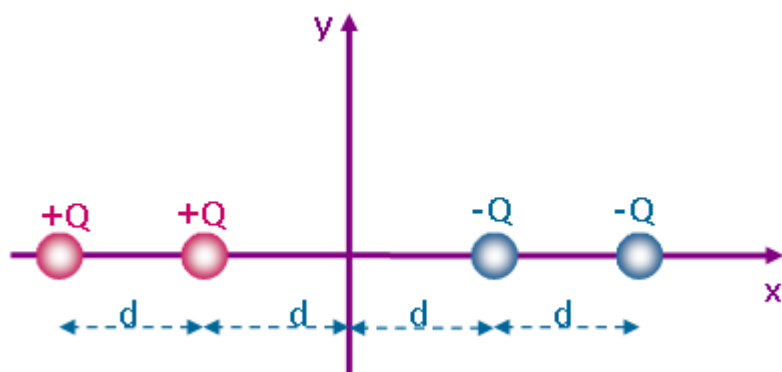
תרגיל 2

ארבעה מטענים נקודתיים מסודרים על ציר ה-x כמתואר בתרשים.

תרשים א



תרשים ב



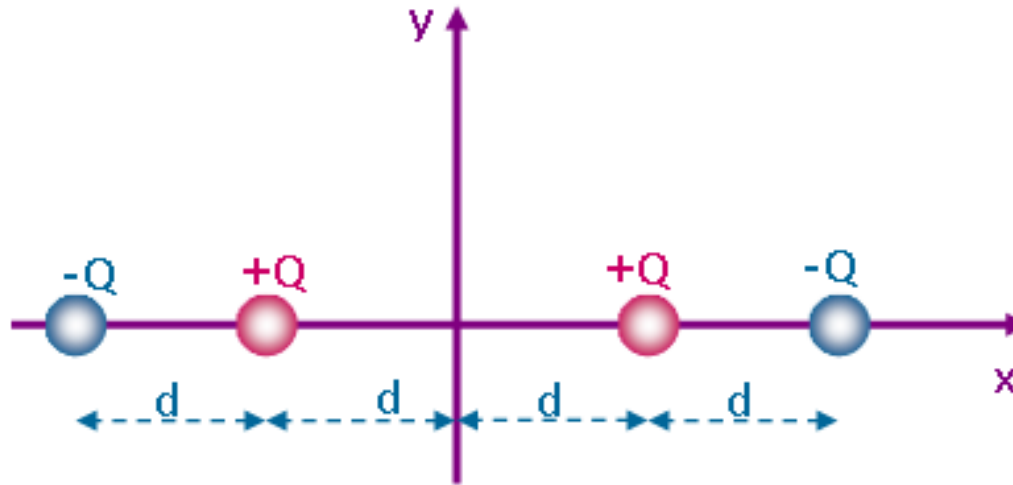
א. מהי האנרגיה הפוטנציאלית החשמלית :

(1) בסידור המתואר בתרשים א?

(2) בסידור המתואר בתרשים ב?

ב. מהי העבודה בהעברת המערכת מהמצב המתואר בתרשים א למצב המתואר בתרשים ב?

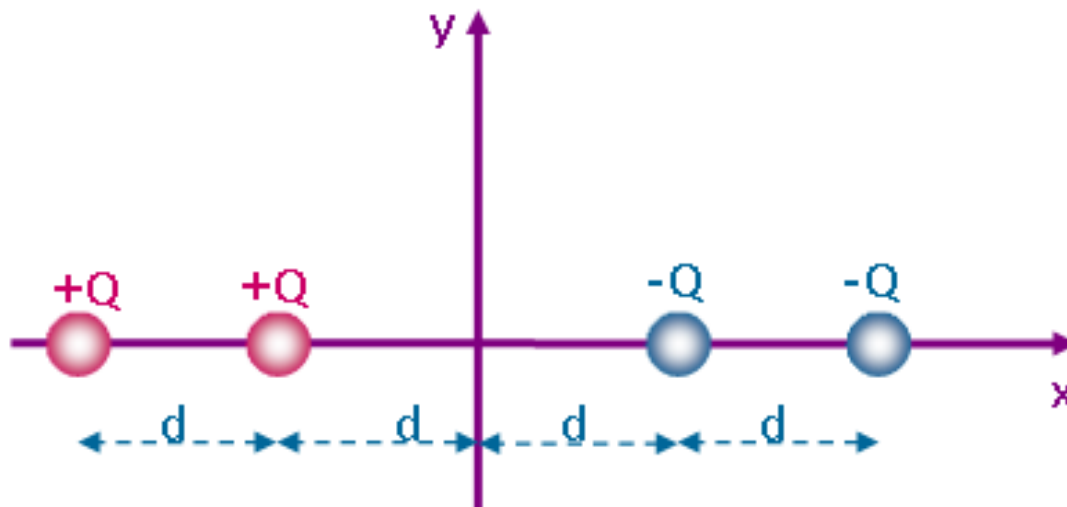
א. 1. מהי האנרגיה הפוטנציאלית החשמלית? (תרשים א)



$$U_{E1} = k \frac{(-Q) \cdot (-Q)}{4d} + k \frac{(-Q) \cdot Q}{3d} + k \frac{(-Q) \cdot Q}{d} +$$

$$+ k \frac{Q \cdot Q}{2d} + k \frac{Q \cdot (-Q)}{3d} + k \frac{Q \cdot (-Q)}{d} = -\frac{23kQ^2}{12d}$$

א. 2. מהי האנרגיה הפוטנציאלית החשמלית? (תרשים ב)

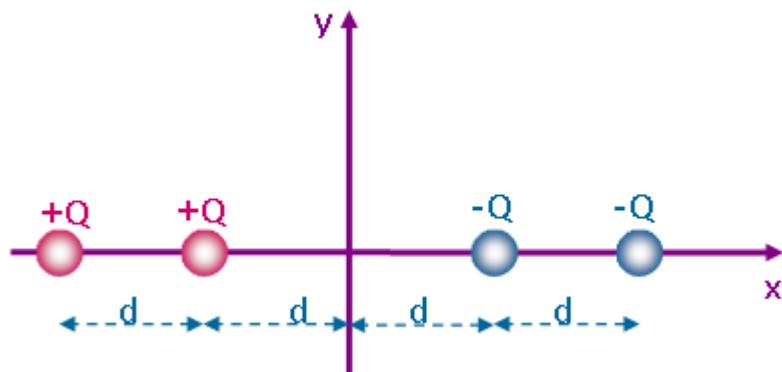


$$U_{E2} = k \frac{(-Q) \cdot Q}{4d} + k \frac{(-Q) \cdot Q}{3d} + k \frac{(-Q) \cdot (-Q)}{d} +$$

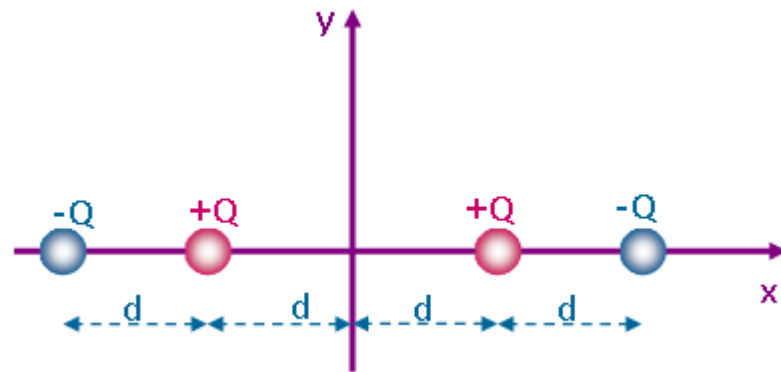
$$+ k \frac{(-Q) \cdot Q}{2d} + k \frac{(-Q) \cdot Q}{3d} + k \frac{Q \cdot Q}{d} = \frac{7kQ^2}{12d}$$

ב. מהי העבודה בהעברת המערכת מהמצב המתואר בתרשים א למצב המתואר בתרשים ב?

תרשים ב



תרשים א



$$W_{1 \rightarrow 2} = \Delta U_E = \Delta U_{E2} - \Delta U_{E1} = \frac{7kQ^2}{12d} - \left(-\frac{23kQ^2}{12d}\right) = 2.5k \frac{Q^2}{d}$$

מקובל לאפיין את המצב החשמלי של כל נקודה בשדה החשמלי במרחב על ידי האנרגיה החשמלית בנקודה זו ליחידת מטען.

גודל זה נקרא **פוטנציאל חשמלי**.

הפוטנציאל החשמלי בנקודה כלשהי יסומן ב- V מכאן, לפי ההגדרה:

$$V = \frac{U_E}{q}$$

U_E – אנרגיה החשמלית של המערכת ביחידות ג'אול

q – המטען בקולון

V – הפוטנציאל החשמלי ביחידות ג'אול חלקי קולון.

יחידה זו נקראת וולט ומסמנים אותה ב- V , ממדיה:

$$[V] = \frac{[J]}{[C]}$$

הפוטנציאל החשמלי בנקודה מסוימת הוא $1V$, אם עבודה של $1J$

כרוכה בהעברת מטען חיובי של $1C$ מהאינסוף עד לנקודה.

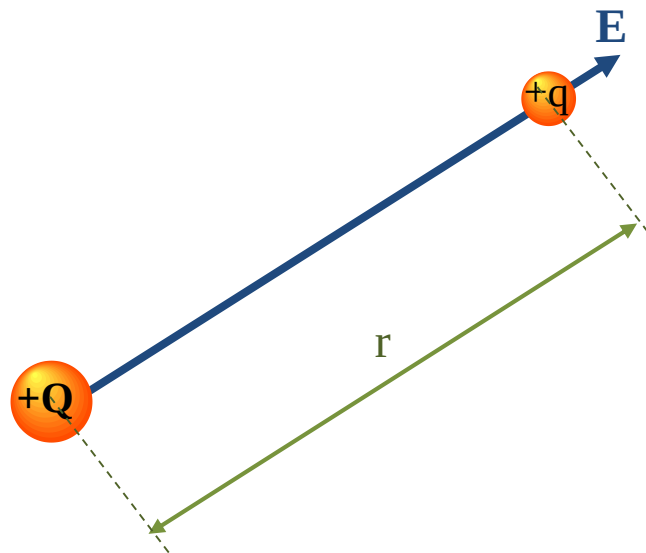
הפוטנציאל הנוצר על ידי מטען נקודתי

הפוטנציאל החשמלי, סביב מטען חיובי $+Q$ שווה לכמות העבודה הכרוכה בהבאת יחידת מטען q מאינסוף לנקודה כלשהי, ושווה גם לאנרגיה הפוטנציאלית החשמלית של שני המטענים ברוחק r זה מזה:

$$W = U_E = k \frac{Q \cdot q}{r}$$

$$V = \frac{W}{q} = \frac{k \frac{Q \cdot q}{r}}{q}$$

$$V = k \frac{Q}{r}$$



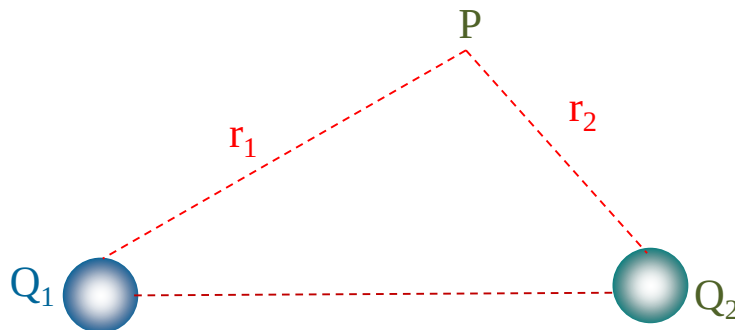
פוטנציאל חיובי: בתהליך מאולץ יש להשקיע עבודה של כוח חיצוני F_{EX} בכדי להעתיק מטען בוחן כנגד השדה החשמלי מאינסוף לנקודה שרירותית A.

לעומת זאת, כאשר הפוטנציאל שלילי: תנועת המטען הינה ספונטנית, ואין צורך להניע את המטען באמצעות כוח חיצוני.

כאשר יש מספר מטענים במרחב, כל אחד מהם תורם ליצירת הפוטנציאל בנקודות המרחב השונות. במקרה כזה, הפוטנציאל בנקודה נתונה P הוא סכום סקלרי של הפוטנציאלים הנוצרים באותה נקודה על ידי המטענים הבודדים כי עבודה הינה גודל סקלרי. לכן, החישוב באמצעות אנרגיה פוטנציאלית פשוט יותר מאשר חישובים באמצעות כוחות ושדות, שהם ווקטורים.

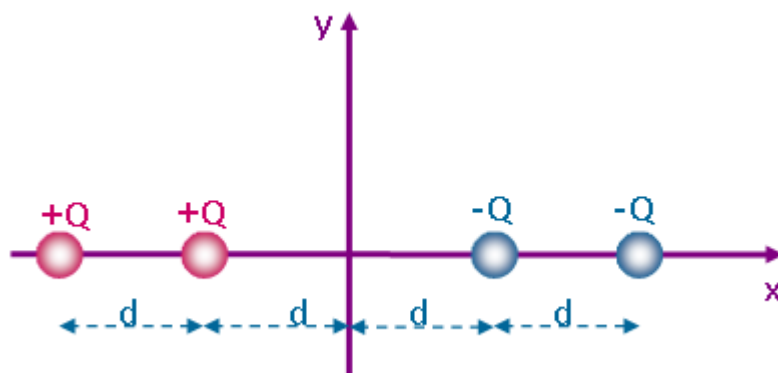
$$V_P = V_1 + V_2 + \dots + V_n$$

$$V_P = k \frac{Q_1}{r_1} + k \frac{Q_2}{r_2} + \dots + k \frac{Q_n}{r_n}$$

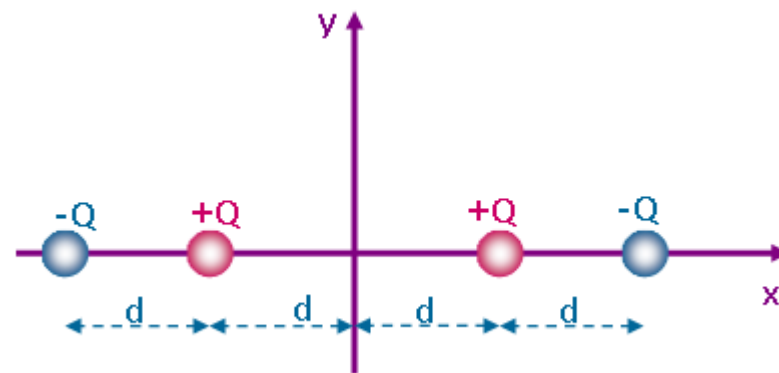


ארבעה מטענים נקודתיים מסודרים על ציר ה-x כמתואר בתרשים.

תרשים ב

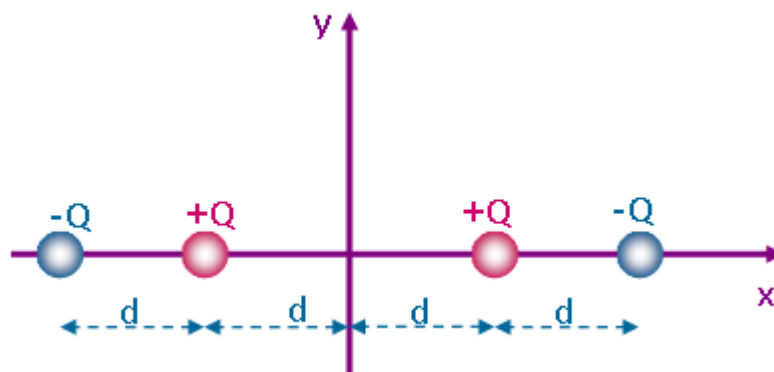


תרשים א



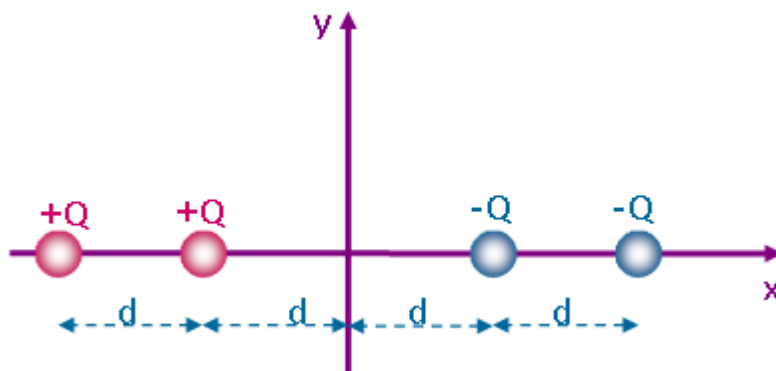
עבור כל אחד מהתרשימים מצא מהו הפוטנציאל החשמלי בראשית הצירים?

תרשים א



$$V = 2k \frac{Q}{d} - 2k \frac{Q}{2d} = k \frac{Q}{d}$$

תרשים ב



$$V = k \frac{Q}{d} - k \frac{Q}{d} + k \frac{Q}{2d} - k \frac{Q}{2d} = 0$$

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



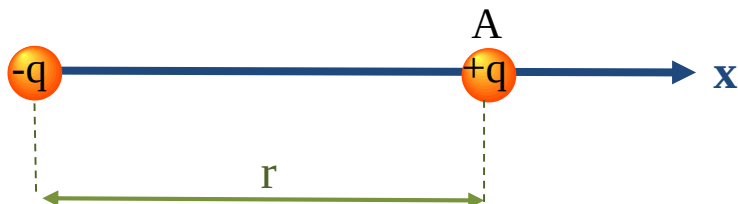
א. האם קיימת נקודה לאורך ציר ה- x ,

(1) שבה השדה החשמלי מתאפס? הסבר.

(2) שבה הפוטנציאל החשמלי מתאפס? הסבר.

בתשובותיך התייחס לציר ה- x כולו – לקטע שבין שני המטענים ולתחום שמחוץ לקטע זה.

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



א. (1) האם קיימת נקודה לאורך ציר ה- x שבה השדה החשמלי מתאפס? הסבר.

תשובה:

לא. בין שני המטענים השדה השקול הוא בכיוון שמאלה. משמאל למטען השמאלי ומימין למטען הימני השדות אמנם מנוגדים אך שונים בעצמתם, כי המרחק משני המטענים שונה.

(2). האם קיימת נקודה לאורך ציר ה- x שבה הפוטנציאל החשמלי מתאפס? הסבר.

תשובה:

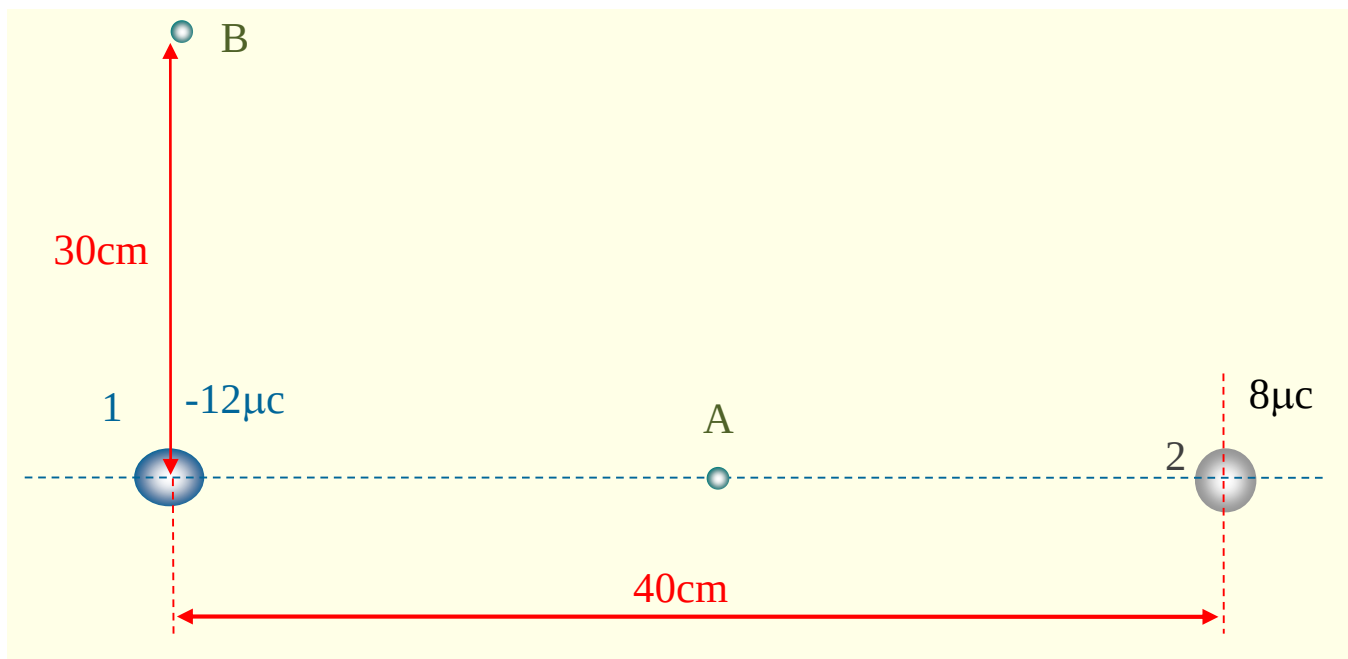
כן. בנקודת האמצע בין שני המטענים הפוטנציאלים שווים בערכם המוחלט ושונים בסימנם.

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

העבודה שווה להפרש האנרגיות הפוטנציאליות החשמליות:

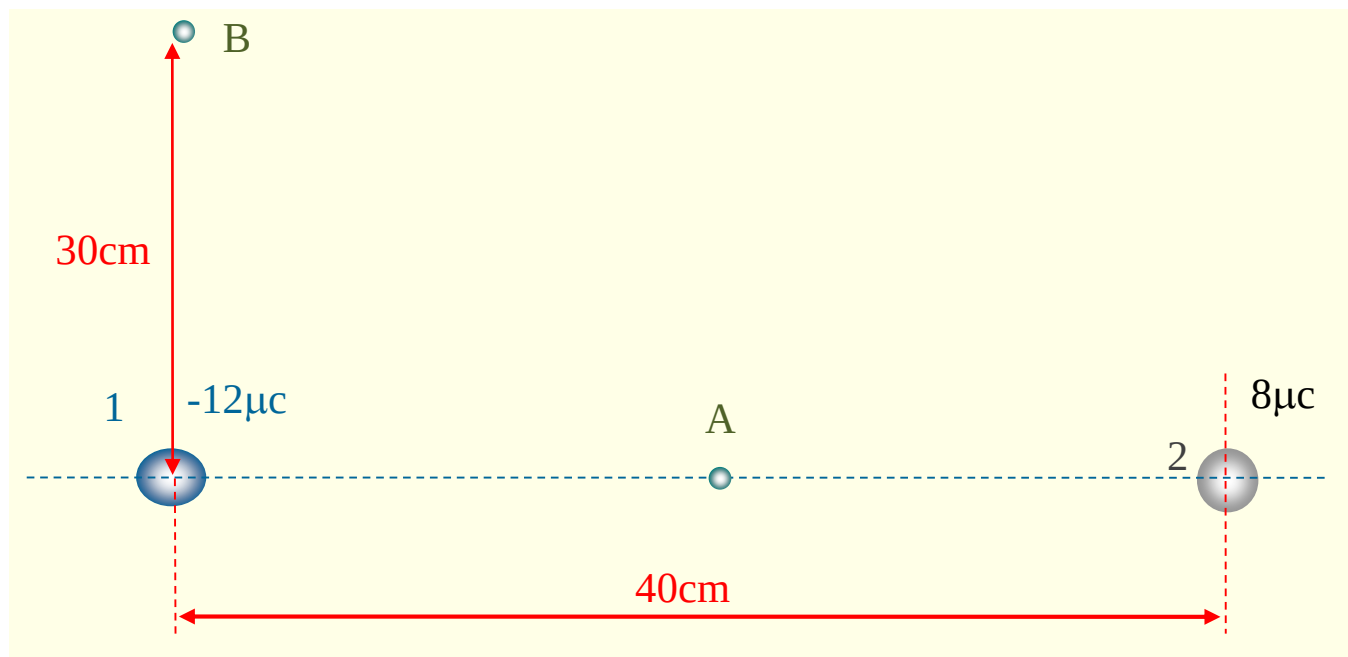
$$W = \Delta U_E = \frac{kq(-q)}{2r} - \frac{kq(-q)}{r} = \frac{kq^2}{2r}$$

שני מטענים נקודתיים של $q_1 = -12[\mu\text{C}]$ ו- $q_2 = 8[\mu\text{C}]$ נמצאים במרחק של 40 ס"מ זה מזה.



- מהו הפוטנציאל החשמלי בנק' A הנמצאת באמצע המרחק בין המטענים?
- היכן לאורך הקו המחבר בין המטענים הפוטנציאל החשמלי שווה אפס?
- מהו הפוטנציאל החשמלי בנק' B הנמצאת במרחק 30 cm בדיוק מעל המטען q_1 ?

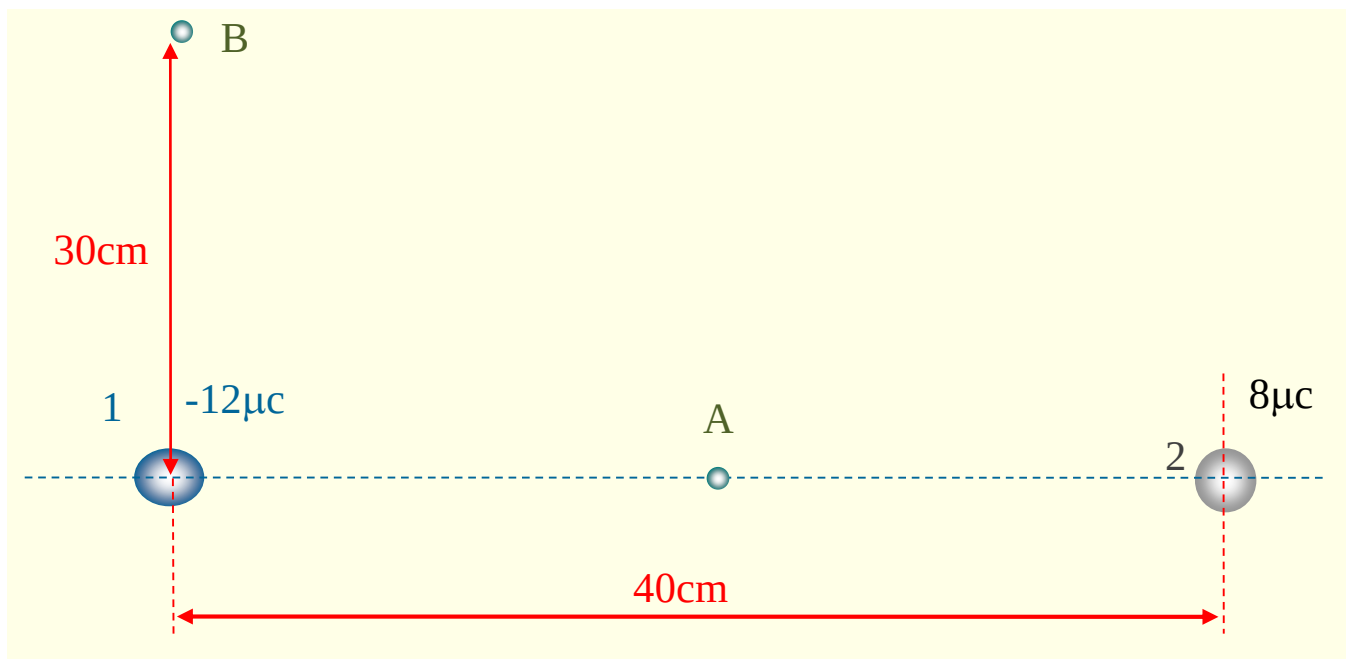
שני מטענים נקודתיים של $q_1 = -12[\mu\text{C}]$ ו- $q_2 = 8[\mu\text{C}]$ נמצאים במרחק של 40 ס"מ זה מזה.



א. מהו הפוטנציאל החשמלי בנק' A הנמצאת באמצע המרחק בין המטענים?

$$V_A = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{(-12 \cdot 10^{-6})}{0.2} + 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{8 \cdot 10^{-6}}{0.2} = -180,000 [\text{V}]$$

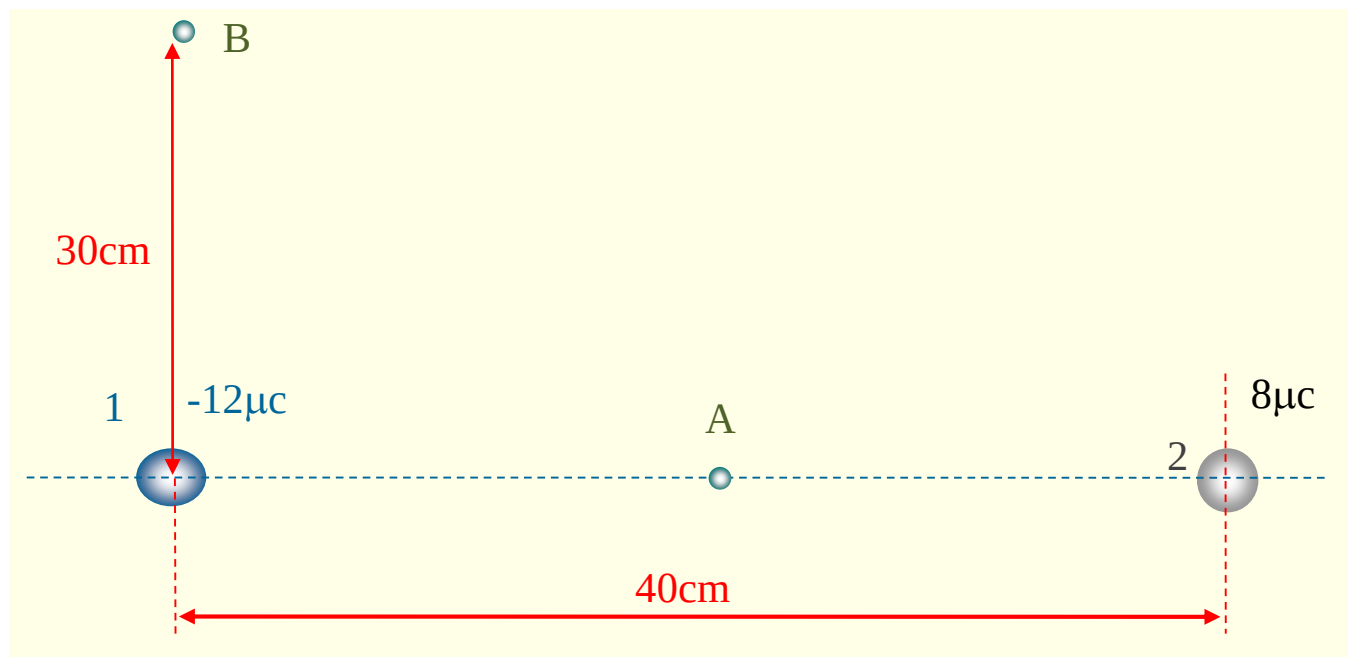
שני מטענים נקודתיים של $q_1 = -12[\mu\text{C}]$ ו- $q_2 = 8[\mu\text{C}]$ נמצאים במרחק של 40 ס"מ זה מזה.



ב. היכן לאורך הקו המחבר בין המטענים הפוטנציאל החשמלי שווה אפס?

$$V_C = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{(-12 \cdot 10^{-6})}{x} + 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{8 \cdot 10^{-6}}{0.4 - x} = 0 \Rightarrow x = 0.16[m]$$

שני מטענים נקודתיים של $q_1 = -12[\mu\text{C}]$ ו- $q_2 = 8[\mu\text{C}]$ נמצאים במרחק של 40 ס"מ זה מזה.

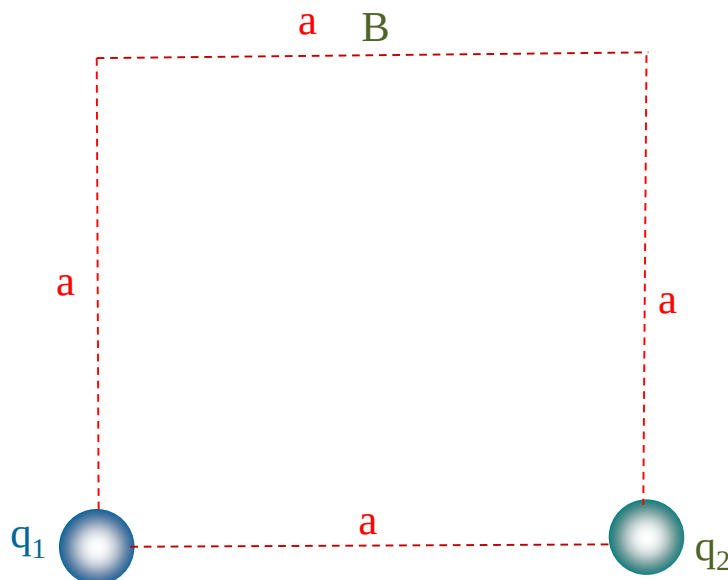


ג. מהו הפוטנציאל החשמלי בנק' B הנמצאת במרחק 30cm בדיוק מעל המטען q_1 ?

$$V_B = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{(-12 \cdot 10^{-6})}{0.3} + 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{8 \cdot 10^{-6}}{\sqrt{0.3^2 + 0.4^2}} = -216,000 [V]$$

שני מטענים זהים נמצאים על הקודקודים של ריבוע שאורך צלעו a .

ערכי המטענים הם: $q_1 = q_2 = q$.



א. מהו הפוטנציאל החשמלי במרכז הריבוע?

ב. מהו גודל המטען q_3 שיש להציב בנק' B הנמצאת באמצע הצלע העליונה בכדי שהפוטנציאל

החשמלי במרכז הריבוע יהיה שווה אפס?

א. מהו הפוטנציאל החשמלי במרכז הריבוע? ◀

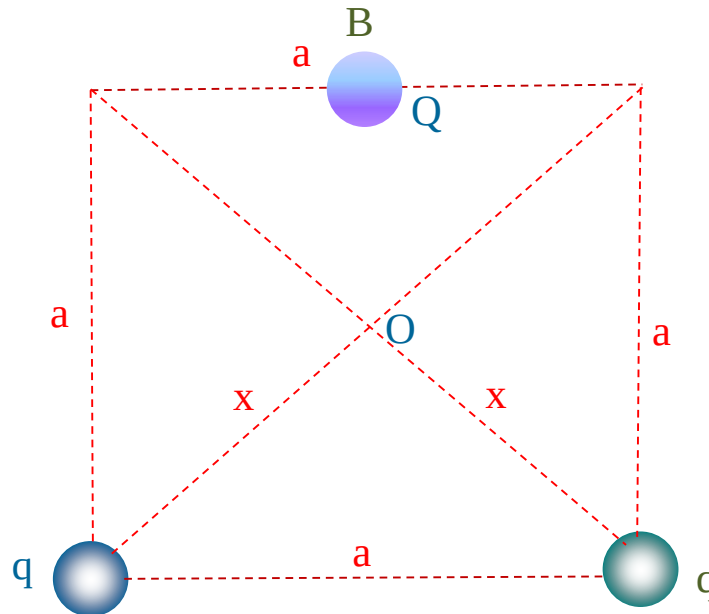
$$V_O = k \cdot \frac{q}{a} \cdot 2 = 2.82k \cdot \frac{q}{a}$$

$$x^2 + x^2 = a^2 \Rightarrow x = \frac{a}{\sqrt{2}}$$

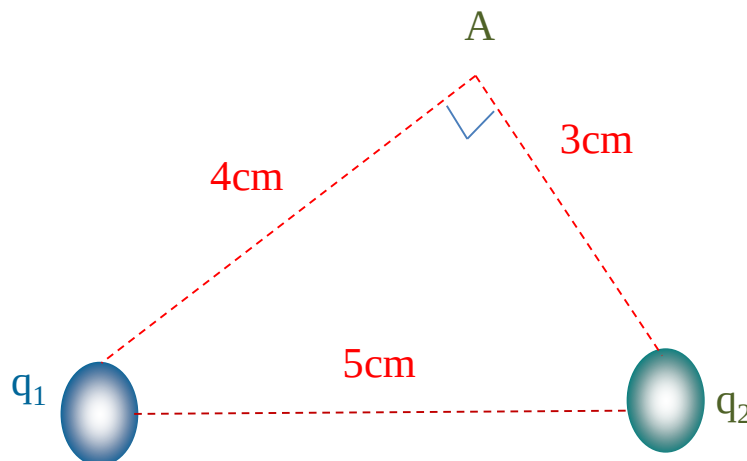
ב. מהו גודל המטען q_3 שיש להציב בנק' B הנמצאת באמצע הצלע העליונה בכדי שהפוטנציאל החשמלי במרכז הריבוע יהיה שווה אפס? ◀

$$k \frac{Q}{0.5a} + 2.82k \cdot \frac{q}{a} = 0$$

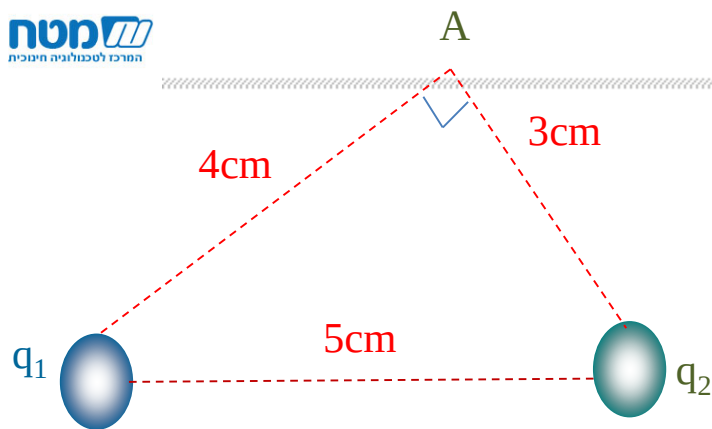
$$Q = -1.141q$$



שני מטענים נקודתיים ממוקמים בקדקודיו של משולש ישר זווית בקצות היתר.
נתון: $q_1 = +4 \cdot 10^{-6} [C]$. נתון כי הפוטנציאל בנקודה A שווה אפס.



- מה גודלו של המטען q_2 ?
- מהי האנרגיה הפוטנציאלית החשמלית של מערכת המטענים? הסבירו את משמעות התוצאה שקבלתם.



נתון: $q_1 = +4 \cdot 10^{-6} \text{ C}$.

נתון כי הפוטנציאל בנקודה A שווה אפס.

א. מה גודלו של המטען q_2 ?

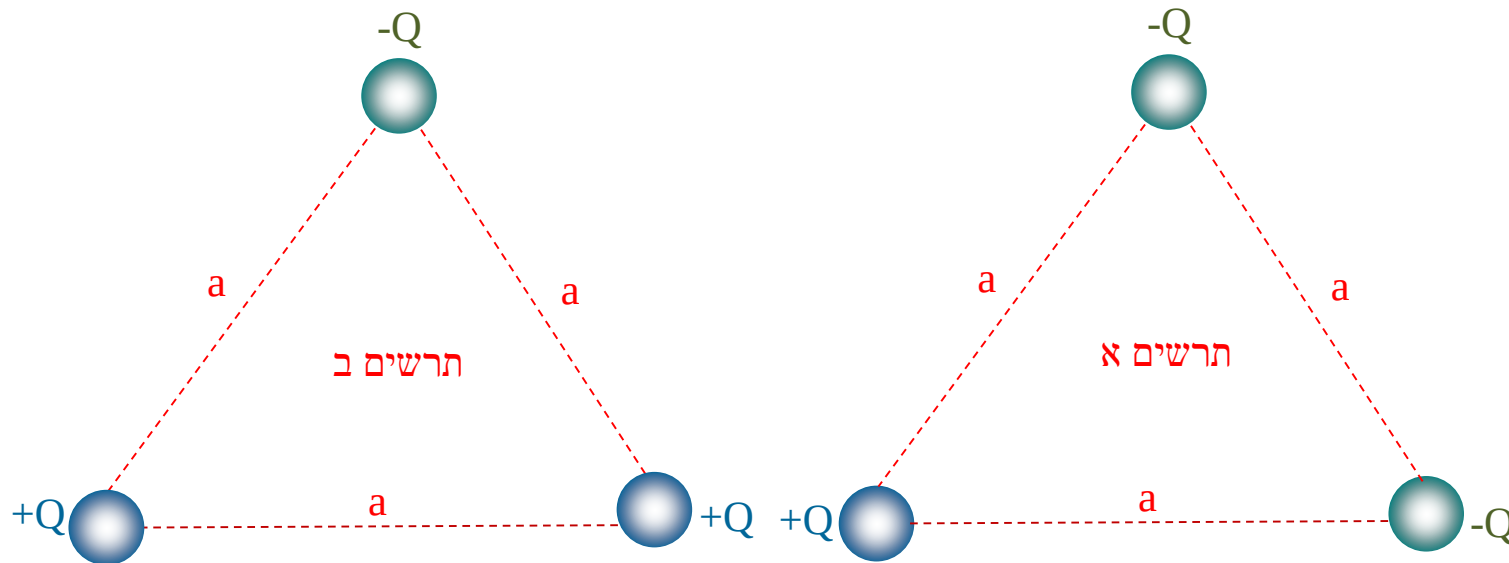
$$V_A = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{4 \cdot 10^{-6}}{0.04} + 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{q_2}{0.03} = 0 \Rightarrow q_2 = -3 \cdot 10^{-6} [\text{C}]$$

ב. מהי האנרגיה הפוטנציאלית החשמלית של מערכת המטענים? הסבירו את משמעות התוצאה שקבלתם.

$$U_E = k \frac{Q \cdot q}{r} = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{4 \cdot 10^{-6} \cdot (-3 \cdot 10^{-6})}{0.05} = -2.16 [\text{J}]$$

יש להשקיע עבודה של $2.16 [\text{J}]$ על ידי כוח חיצוני בכדי להעביר את המטענים ממצבם הנוכחי לאינסוף.

נתונים 3 מטענים בעלי גודל מטען שווה וסימנים שונים, המונחים בקדקודיו של משולש שווה צלעות בעל צלע a . חשבו את הפוטנציאל החשמלי הנוצר במרכז המשולש עבור כל תרשים.

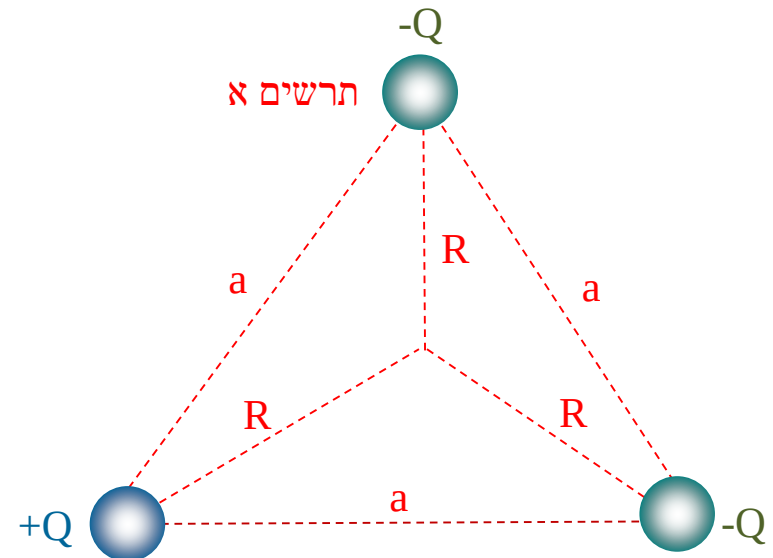


נתונים 3 מטענים בעלי גודל מטען שווה וסימנים שונים, המונחים בקדקודיו של משולש שווה צלעות בעל צלע a . חשבו את הפוטנציאל החשמלי הנוצר במרכז המשולש עבור כל תרשים.

תרשים א: ◀

$$R = \frac{a}{\sqrt{3}}$$

$$V_0 = k \cdot \frac{(-Q)}{\frac{a}{\sqrt{3}}} \cdot 2 + k \cdot \frac{Q}{\frac{a}{\sqrt{3}}} = -1.732k \cdot \frac{Q}{a}$$

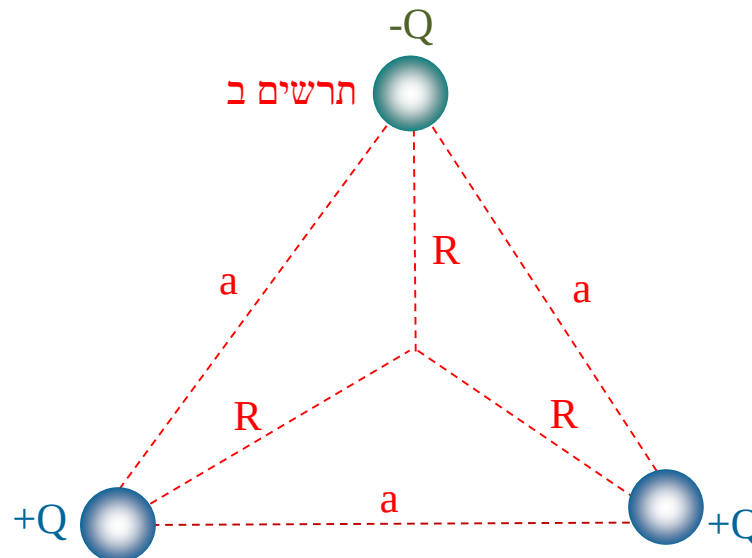


נתונים 3 מטענים בעלי גודל מטען שווה וסימנים שונים, המונחים בקדקודיו של משולש שווה צלעות בעל צלע a . חשבו את הפוטנציאל החשמלי הנוצר במרכז המשולש עבור כל תרשים.

תרשים ב: ◀

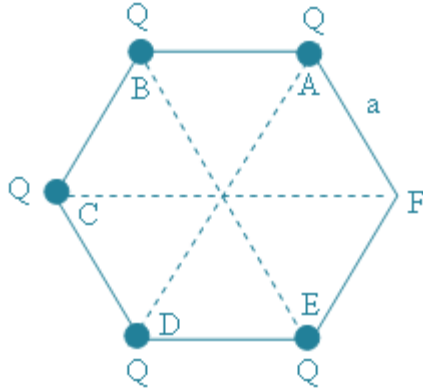
$$R = \frac{a}{\sqrt{3}}$$

$$V_0 = k \cdot \frac{Q}{\frac{a}{\sqrt{3}}} \cdot 2 - k \cdot \frac{Q}{\frac{a}{\sqrt{3}}} = 1.732k \cdot \frac{Q}{a}$$



בכל אחד מחמשת הקדקודים A, B, C, D, E של משושה משוכלל, שאורך צלעו a, נמצא מטען נקודתי חיובי Q. בקדקוד F אין מטען (ראה תרשים).

בטא את תשובותיך לשאלות באמצעות נתוני השאלה.



- מהו השדה החשמלי השקול (גודל וכיוון) במרכז הסימטריה O של המשושה? הסבר
- מעבירים מטען נוסף Q ממקום רחוק מאוד ("אינסוף" אל הנקודה O).

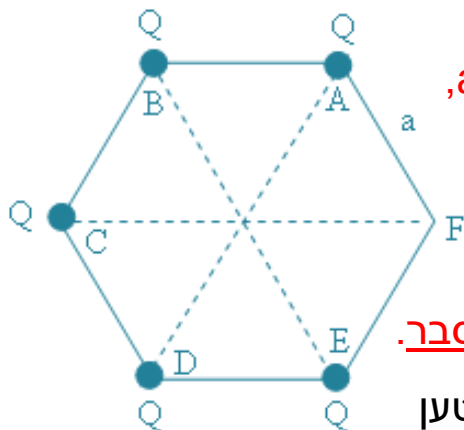
מהי העבודה שנעשתה נגד כוחות השדה החשמלי?

- מעבירים את המטען הנוסף Q מהמרכז O לקדקוד השישי F (בכל אחד מקדקודי המשושה נמצא עתה מטען Q).

(1) מהו השדה החשמלי בנקודה O? נמק.

(2) האם דרושה עבודה, כדי להביא מטען q מאינסוף אל מרכז המשושה? נמק.

- בכל אחד משלושת הקדקודים A, C, E מחליפים את המטען Q במטען שלילי -Q. (בכל אחד משלושת הקדקודים האחרים נמצא מטען Q, ובנקודה O אין מטען). האם פעולה זו תגרום לשינוי בפוטנציאל החשמלי במרכז המשושה? הסבר.



בכל אחד מחמשת הקדקודים A, B, C, D, E של משושה משוכלל, שאורך צלעו a, נמצא מטען נקודתי חיובי Q. בקדקוד F אין מטען (ראה תרשים).

בטא את תשובותיך לשאלות באמצעות נתוני השאלה.

א. מהו השדה החשמלי השקול (גודל וכיוון) במרכז הסימטריה O של המשושה? הסבר.
השדות הנוצרים ע"י המטענים ב-A, B, E ו-D מתבטלים (השדה החשמלי מהמטען

שב-A מתבטל עם זה שב-D, וזה שב-B מתבטל עם זה שב-E).

$$E = \frac{kq}{a^2}$$

השדה ב-O מקורו במטען שבנקודה C, לכן כיוונו מ-O ל-F וגודלו:
(a – המרחק מקודקוד למרכז).

ב. מעבירים מטען נוסף Q ממקום רחוק מאוד ("אינסוף" אל הנקודה O).

מהי העבודה שנעשתה נגד כוחות השדה החשמלי?

הפוטנציאל ב-O הוא סכום אלגברי של הפוטנציאלים מחמשת המטענים:

$$W = Q(V_0 - V_\infty)$$

$$V_\infty = 0$$

$$V_0 = \frac{k \cdot 5Q}{a}$$

$$W = Q \left(\frac{k \cdot 5Q}{a} - 0 \right) = \frac{k \cdot 5Q^2}{a}$$

ג. מעבירים את המטען הנוסף Q מהמרכז O לקדקוד השישי F (כך שבכל אחד מקדקודי המשושה נמצא עתה מטען Q).

(1) מהו השדה החשמלי בנקודה O ? נמקו.

תשובה: לאחר העברת המטען לנקודה F השדה החשמלי בנקודה O מתאפס בגלל קיזוז השדות

של מטענים נגדיים. $W = Q(V_0 - V_\infty)$

$$V_\infty = 0$$

(2) האם דרושה עבודה, כדי להביא מטען q מאינסוף אל מרכז המשושה? נמקו.

תשובה: כן, דרושה עבודה להביא מטען q אל מרכז המשושה, כי הפוטנציאל באינסוף הוא אפס, ובמרכז O הפוטנציאל שונה מאפס.

ד. בכל אחד משלושת הקדקודים A, C ו- E מחליפים את המטען Q במטען שלילי $-Q$ (בכל אחד משלושת הקדקודים האחרים נמצא מטען Q , ובנקודה O אין מטען). האם פעולה זו תגרום לשינוי בפוטנציאל החשמלי במרכז המשושה? הסבירו.

תשובה: כאמור בסעיף הקודם הפוטנציאל במרכז O היה שונה מאפס, ועתה הפוטנציאל ב- O מתאפס.

מספר המטענים השליליים שווה למספר המטענים החיוביים וכולם באותו המרחק מ- O .

עד כה מצאנו שעוצמת השדה החשמלי, הנוצר על ידי **כדור מוליך** טעון שהמטען מפוזר על פניו באופן אחיד, בנקודות שונות מחוץ לכדור $r > R$, שווה לזו שהייתה מתקבלת אילו כל המטען היה מרוכז במרכז:

$$E = k \frac{Q}{r^2}$$

ממרכז הכדור ועד לפני הכדור $r < R$ השדה החשמלי שווה אפס.

בתיאור המצב החשמלי, הנוצר במרחב על ידי הקליפה, באמצעות הפוטנציאל החשמלי, נוכל אפוא להניח כי נתון לנו מטען נקודתי שגודלו Q . מכאן:

כאשר $r > R$ הפוטנציאל נתון על ידי:

$$V = k \frac{Q}{r}$$

כאשר $r = R$ הפוטנציאל נתון על ידי:

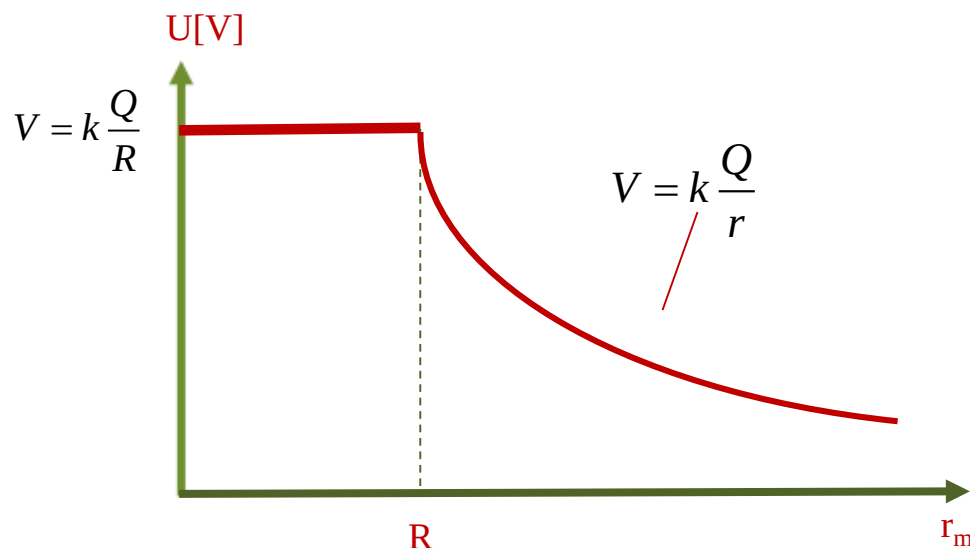
$$V = k \frac{Q}{R}$$

כאשר $r < R$ הפוטנציאל נתון על ידי:

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

בחלל הקליפה השדה החשמלי שווה לאפס, אין אפוא צורך להשקיע עבודה בהעתקת יחידת מטען חיובי בתוך חלל הקליפה. לכן הפוטנציאל קבוע ושווה לזה שעל פניו. יש להשקיע עבודה בהבאת יחידת מטען חיובי מהאינסוף רק עד לקליפה.

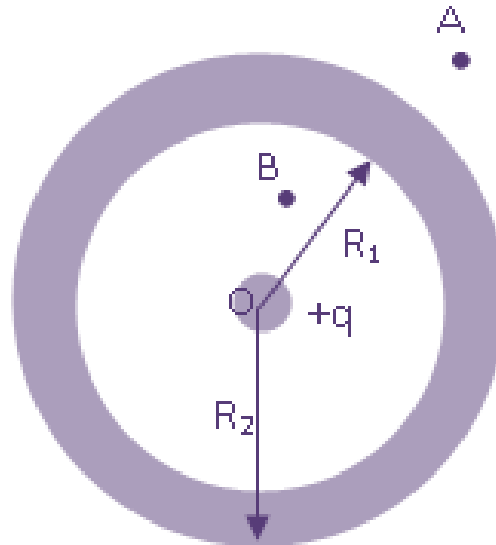
מסקנות:



1. ממרכז הקליפה ועד לפני הקליפה הפוטנציאל החשמלי הוא קבוע.
2. על פני הקליפה הפוטנציאל החשמלי הוא קבוע ושווה לזה שבתוך הקליפה.
3. במרחקים הגדולים מרדיוס הקליפה הפוטנציאל החשמלי קטן ונמצא ביחס הפוך למרחק ממרכז הקליפה.

מטען נקודתי $+q$ נמצא בנקודה O . נקודות A ו- B נמצאות במרחקים r_a ו- r_b בהתאמה, מהנקודה O . מקיפים את המטען הנקודתי בקליפה כדורית מוליכה בלתי טעונה, שמרכז O ורדיוסים, R_1 ו- R_2 . כמתואר בתרשים.

נתונים: k, q, r_a, r_b, R_1, R_2



- א. מהו השדה החשמלי בנקודה A לפני הוספת הקליפה, ואחרי הוספת הקליפה?
- ב. מהו הפוטנציאל החשמלי בנקודה A לפני הוספת הקליפה, ואחרי הוספת הקליפה?
- ג. מהו השדה החשמלי בנקודה B לפני הוספת הקליפה, ואחרי הוספת הקליפה?
- ד. מהו הפוטנציאל החשמלי בנקודה B לפני הוספת הקליפה, ואחרי הוספת הקליפה?

א+ב. כתוצאה מהוספת הקליפה הכדורית, המטען הנקודתי ישרה על המשטח הפנימי של הקליפה המוליכה מטען $-q$, ומטען על המשטח החיצוני $+q$.

חישוב השדה והפוטנציאל ב- A נעשה כאילו כל המטענים מרוכזים בנקודה O.

מאחר ותרומת המטענים שעל הקליפה למטען הכולל ב- O היא אפס, נקבל

שהשדה החשמלי והפוטנציאל החשמלי בנקודה A לא ישתנו כתוצאה מהוספת הקליפה

ויהיו שווים ל:

$$E_A = \frac{k \cdot q}{r_A^2}$$

$$V_A = \frac{k \cdot q}{r_A}$$

ג. השדה החשמלי ב- B הודות למטענים שעל הקליפה הוא אפס. ניתן להסתכל על המשטח הפנימי ועל המשטח החיצוני של הקליפה כעל שני כדורים מוליכים טעונים. השדה בתוך כל כדור, הודות למטען שעל פניו שווה לאפס. לכן השדה החשמלי בנקודה B לא ישתנה.

$$E_A = \frac{k \cdot q}{r_A^2}$$

$$V_B = \frac{k \cdot q}{r_B}$$

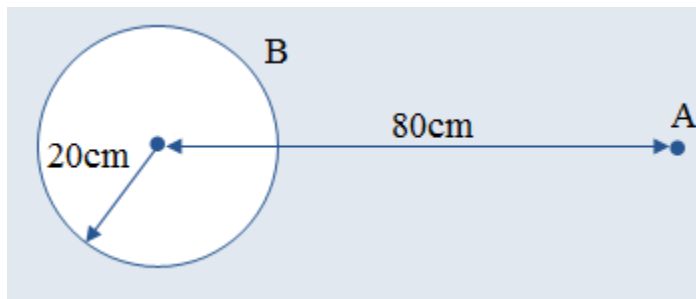
ד. לפני הוספת קליפה היה הפוטנציאל בנקודה B:

הפוטנציאל בתוך כדור טעון שווה לפוטנציאל על שפתו, ולכן הפוטנציאל ב- B לאחר הוספת הקליפה:

$$V_B = \frac{k \cdot q}{r_B} - \frac{k \cdot q}{R_1} + \frac{k \cdot q}{R_2}$$

אלקטרון משוחרר ממונחה מנקודה A, הנמצאת במרחק של 80 cm ממרכז של קליפה כדורית (כדור חלול) שרדיוסה 20 cm (ראה תרשים).

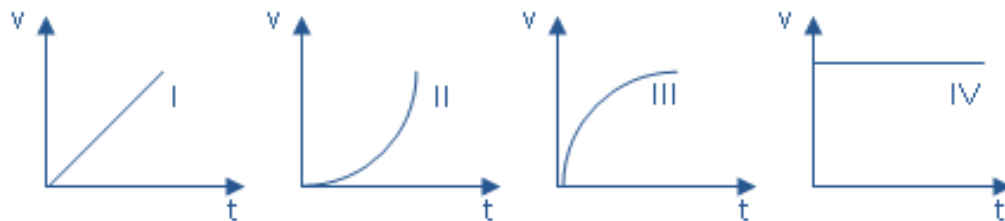
הקליפה הכדורית טעונה באופן אחיד במטען של $q_1 = 5 \cdot 10^{-8} \text{C}$.



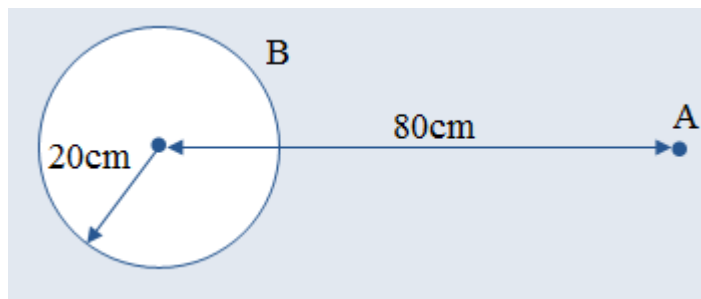
א. באיזו מהירות יפגע האלקטרון בפני הקליפה?

ב. לפניך ארבעה גרפים I-IV המתארים באופן סמכתי מהירות כפונקציה של זמן.

קבע איזה מהגרפים I – IV מתאר את מהירותו של האלקטרון הנע כלפי הקליפה הכדורית (סעיף א).



א. ◀

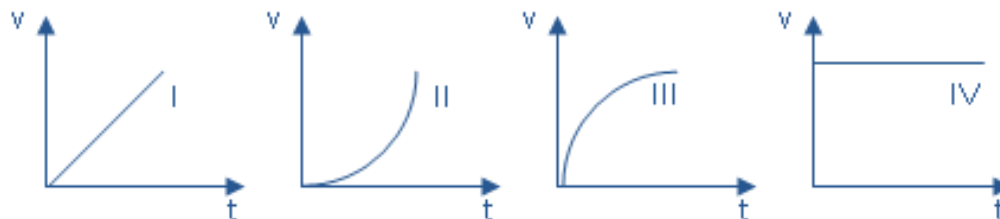


$$\frac{k \cdot Q \cdot q_e}{R_A} = \frac{k \cdot Q \cdot q_e}{R_B} + \frac{m_e \cdot v_B^2}{2}$$

$$\frac{9 \cdot 10^9 \cdot 5 \cdot 10^{-8} \cdot (-1.6 \cdot 10^{-19})}{0.8} = \frac{9 \cdot 10^9 \cdot 5 \cdot 10^{-8} \cdot (-1.6 \cdot 10^{-19})}{0.2} + \frac{9.1 \cdot 10^{-31} \cdot v_B^2}{2}$$

$$v_B = 2.43 \cdot 10^7 \left[\frac{m}{s} \right]$$

ב. ▶ כאשר האלקטרון נע כלפי הקליפה הכדורית כוח המשיכה החשמלי גדל, ולכן גדלה גם תאוצת האלקטרון. בגרף II שיפוע הגרף של המהירות כפונקציה של הזמן (התאוצה) הולך וגדל.



◀ העבודה שמבצע הכוח החיצוני כנגד הכוח החשמלי על מטען חשמלי חיובי, בעת העתקתו אינה תלויה במסלול אלא רק בנקודות ההתחלה והסיום.

$$\Delta W_{A \rightarrow B} = kqQ \left(\frac{1}{r_B} - \frac{1}{r_A} \right)$$

◀ הכוח החשמלי הוא כוח משמר, ולכן ניתן להגדיר לו אנרגיה פוטנציאלית חשמלית.

◀ אנרגיה פוטנציאלית חשמלית- אנרגיה הנרכשת על ידי המערכת כתוצאה מעבודה חיובית הנעשית על מטען q כשהוא מועתק מאינסוף למרחק r ממטען אחר Q על ידי כוח חיצוני.

$$U_E = k \frac{Q \cdot q}{r}$$

◀ עבודת הכוח החיצוני שווה לשינוי באנרגיה הפוטנציאלית החשמלית בין שתי נקודות בשדה.

$$\Delta W_{A \rightarrow B} = kqQ \left(\frac{1}{r_B} - \frac{1}{r_A} \right) = U_{E_B} - U_{E_A}$$

◀ הפוטנציאל החשמלי, סביב מטען חיובי $+Q$ שווה לכמות העבודה הכרוכה בהבאת יחידת מטען q

מאינסוף לנקודה כלשהי, ושווה גם לאנרגיה הפוטנציאלית החשמלית של שני המטענים ברוחק r זה

מזה:

$$V = \frac{W}{q}$$

$$V = \frac{U_E}{q}$$

$$V = k \frac{Q}{r}$$