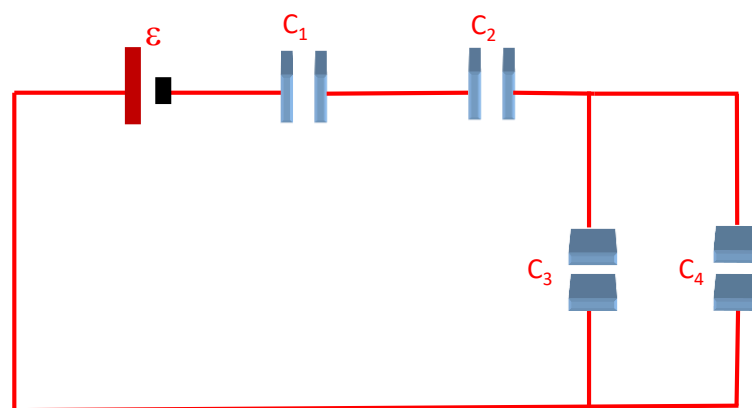


חשמל

קיבול חשמלי

חלק ב'



◀ סוגי קבלים:

– קבל לוחות,

– קבל כדורי,

– כדור בודד.

◀ הפרמטרים הכרוכים בשינוי קיבולו של קבל.

◀ העבודה החיצונית הכרוכה בשינוי קיבולו של קבל.

◀ ישנם קבלים בעלי צורות ומאפיינים השונים זה מזה ומותאמים לצרכים הטכנולוגיים בהם.

◀ קיבולו של קבל, כפי שיתברר בהמשך תלוי בצורתו הגיאומטרית של הקבל ובסוג התנ"ך (מדיום) שבין מוליכי הקבל.

◀ התנ"ך (מדיום) שבין מוליכי הקבל נקרא בשם: "תנ"ך דיאלקטרי".

◀ המונח: "דיאלקטרי", פירושו המילולי הוא: לא אלקטרי. והכוונה היא לחומר מבדד היוצר מ"ץ בין מוליכי הקבל.

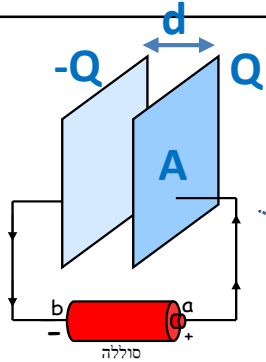
◀ במתכונת החומר לבחינות הבגרות עלינו להכיר שני סוגים של קבלים השונים זה מזה בצורתם הגיאומטרית:

1. קבל לוחות.

2. קבל כדורי.

(בנספח א' נציג גם את הקבל הגלילי)

קבל לוחות :

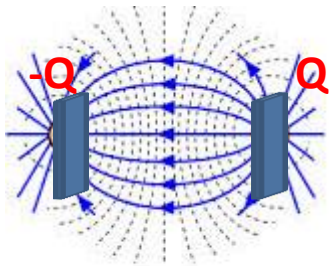


קבל לוחות בנוי משני לוחות מוליכים, מקבילים זה לזה.

שטחו של כל לוח הוא A .

המרחק בין הלוחות הוא d .

הלוחות נטענים ע"י הסוללה במטענים שווים וגודל והפוכי סימן. (ראו איור 1)



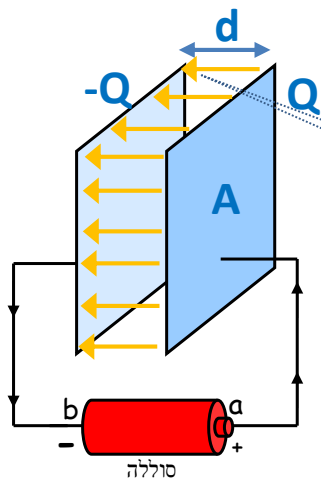
בין שני הלוחות הטעונים נוצר שדה חשמלי. חלקו הארי של השדה

מצוי בתווך שבין לוחות הקבל אבל גם מחוץ ללוחות נוצר שדה. (ראו איור 2)

לתופעת זליגת השדה אל מחוץ למרחב שבין לוחות הקבל

קוראים בשם: "שפיית השדה" או: "אפקט קצוות". חלק מהאנרגיה

של קבל לוחות "דולפת" אל מחוץ לקבל.

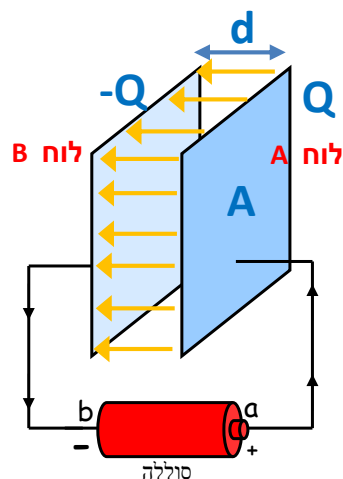


אם הלוחות קרובים מאד זה לזה, כלומר: $d \ll \sqrt{A}$, ניתן, בקירוב טוב,

להתייחס לשדה זה כאל שדה אחיד השורר כולו בתוך בין הלוחות. ראו איור 3

במסגרת הנוכחית של לימודנו, נתייחס, כמעט ללא יוצא מן הכלל, למצב

המתואר באיור (3). מכנים קבל לוחות כזה: קבל לוחות אידאלי.



את עצמתו $|\vec{E}| = \frac{\sigma}{\epsilon_0}$ של השדה החשמלי השורר בין שני הלוחות

של קבל לוחות אידאלי חישבנו כבר בפרקים קודמים.

(כאשר σ היא צפיפותו המשטחית של מטען הקבל ו ϵ_0 הוא המקדם

הדיאלקטרי של ואקום (ריק).

על מנת לחשב את קיבולו של הקבל-ניעזר בהגדרת הקיבול : $C \equiv \frac{Q}{V_{AB}}$.

נקבל:

$$C \equiv \frac{Q}{V_{AB}} = \frac{\sigma \cdot A}{\frac{\sigma}{\epsilon_0} \cdot d} = \frac{\epsilon_0 \cdot A}{d}$$

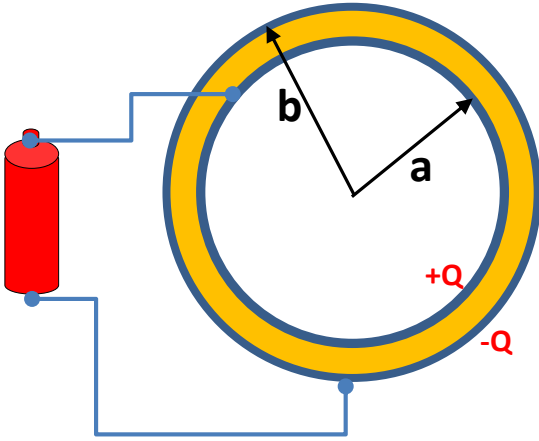
$$C = \frac{\epsilon_0 \cdot A}{d}$$

קיבולו של קבל לוחות אידאלי הוא לפיכך :

חשוב מאד לשים לב שלמרות הגדרת הקיבול כיחס בין מטענו של הקבל לבין הפרש הפוטנציאלים בין

לוחותיו, קיבולו אינו תלוי, לא במטען ולא בהפרש הפוטנציאלים. **הקיבול הוא מאפיין גיאומטרי.**

עבור קבל אשר צורתו קבועה - הקיבול הוא קבוע.



◀ קבל כדורי עשוי משתי קליפות כדוריות, מוליכות וקונצנטריות (משותפות מרכז).

◀ רדיוסי הקליפות הם: a ו- b (ראו איור).

◀ את החלל בין הקליפות ממלאים בדרך כלל בחומר דיאלקטרי (מבדד).

◀ השדה החשמלי קיים רק בחלל שבין הקליפות. במרחב שמחוץ לאזור זה-אין שדה. (אתם מוזמנים להוכיח זאת באמצעות חוק גאוס).

◀ מהיבט זה הקבל הכדורי אוגר את כל האנרגיה האצורה בו- בתוכו. אין שפיית שדה ואין זליגת אנרגיה אל מחוץ לקבל.

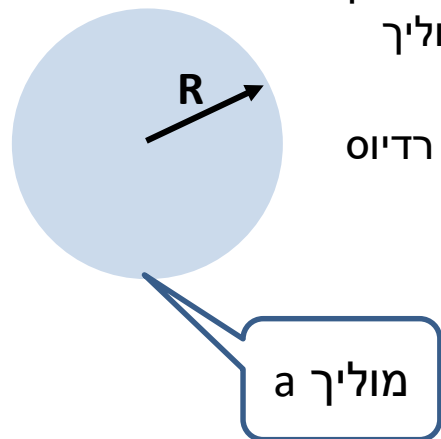
◀ את קיבולו של הקבל הכדורי נחשב גם כאן על פי הגדרת הקיבול:

$$C \equiv \frac{Q}{V_{AB}}$$

$$C \equiv \frac{Q}{V_{AB}} = \frac{Q}{V_A - V_B} = \frac{Q}{\left[\frac{kQ}{4a^2} - \frac{kQ}{4b^2} \right] - \left[\frac{kQ}{4b^2} - \frac{kQ}{4b^2} \right]} = \frac{ab}{k(b-a)}$$

V_A $V_B=0$

$$C = \frac{ab}{k(b-a)}$$



כפי שכבר כתבנו-ניתן גם להתייחס **למוליך בודד** כאל קבל (נניח מוליך a) ואז המוליך השני (b) נמצא כביכול במרחק אינסופי מהמוליך הראשון (a). ברור שמעשית מוליך (b) אינו קיים כלל.

במקרה שלנו נתון כדור מוליך בעל רדיוס R . ניתן לדמין מעטפת מוליכה בעלת רדיוס אינסופי המהווה את "המוליך השני".

את קיבולו של הכדור נחשב בשתי דרכים :

א. על פי הגדרת קיבולו של מוליך בודד.

ב. על פי נוסחת הקיבול של קבל כדורי.

◀ **דרך א' - על פי הגדרת קיבולו של מוליך בודד:** $C \equiv \frac{Q}{V}$.

"נטען" (מחשבתית) את הכדור במטען Q .

הפוטנציאל שלו ביחס ל"אינסוף" הוא : $V = \frac{kQ}{R}$, לכן קיבולו : $C \equiv \frac{Q}{V} = \frac{Q}{\frac{kQ}{R}} = \frac{R}{k}$

◀ **דרך ב' - על פי נוסחת הקיבול של קבל כדורי:** $C = \frac{ab}{k(a-b)}$ ומכאן : $C = \frac{a}{k} \lim_{b \rightarrow \infty} \frac{b}{b - \underbrace{a}_{\text{Negligible}}} = \frac{a}{k} \cdot \frac{R}{k}$

◀ כלומר קיבולו של כדור מוליך בודד :

$$C = \frac{R}{k}$$

הפרמטרים הכרוכים בשינוי קיבולו של קבל (1)

◀ כפי שכבר הזכרנו: קיבולו של קבל תלוי בשני פרמטרים בלבד:

1. הגיאומטריה שלו-כלומר צורת המבנה שלו.

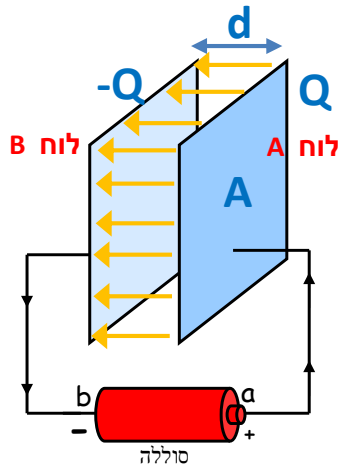
2. התוך (המדיום) המפריד בין שני מוליכי הקבל

◀ בשלב זה נעסוק רק בהשפעת שינוי הגיאומטריה של הקבל על קיבולו.

1. שינוי קיבולו של קבל לוחות

קיבולו של קבל לוחות נתון בנוסחא: $C = \frac{\epsilon_0 \cdot A}{d}$. לפיכך קיבול

הקבל יגדל אם נגדיל את שטח לוחותיו ו/או נקטין את המרחק בין לוחותיו.

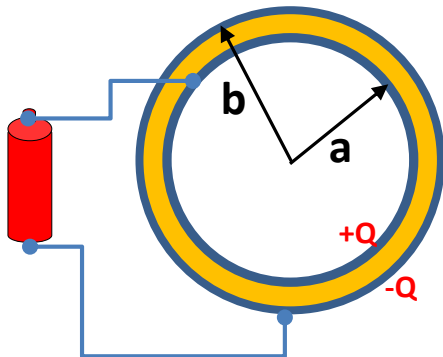


2. שינוי קיבולו של קבל כדורי

קיבולו של קבל כדורי נתון בנוסחא: $C = \frac{ab}{k(b-a)}$.

לפיכך קיבול הקבל יגדל אם נגדיל את רדיוסו הפנימי 'a' של הקבל

ו/או נקטין את ההפרש בין שני הרדיוסים.



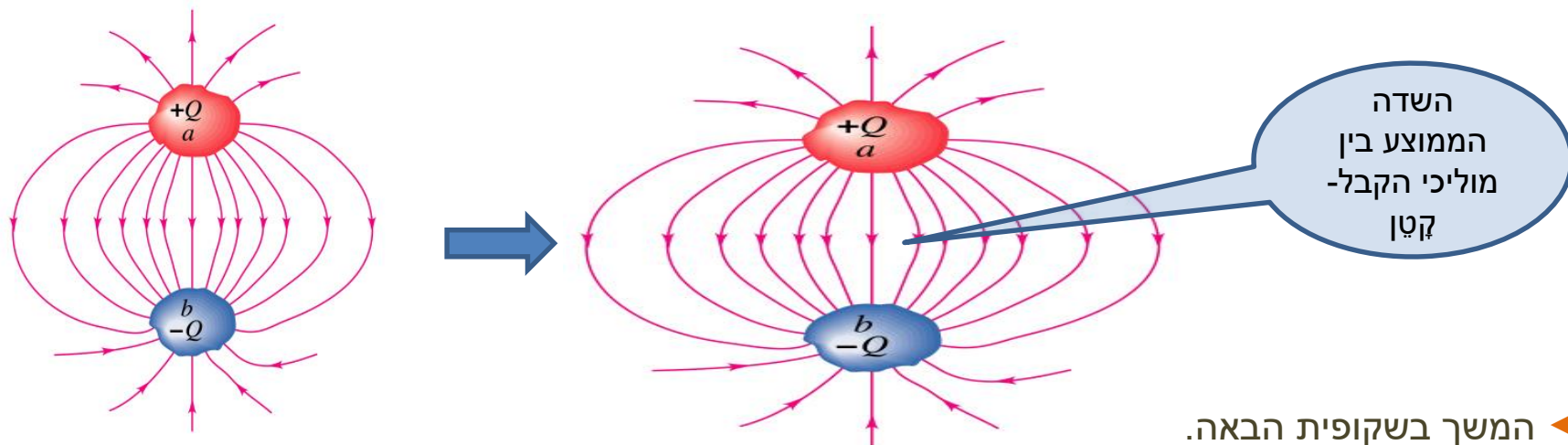
הפרמטרים הכרוכים בשינוי קיבולו של קבל (2)

- שתי הדוגמאות שהראנו בשקופית הקודמת (קבל לוחות וקבל כדורי) הנוגעות למאפיינים של שינוי הקיבול, הינן מקרים פרטיים ואת המאפיינים לשינוי הקיבול הסקנו מתוך נוסחאות הקיבול.
- ניתן להסביר, **על בסיס פיסיקלי**, כי ככל שנגדיל את ממדי הקבל וככל שנקרב את מוליך A אל מוליך B של הקבל - קיבול הקבל יגדל ואין זה משנה באיזה סוג קבל מדובר.
- נתבונן בקבל פְּלִי טעון העשוי משני מוליכים a ו b :

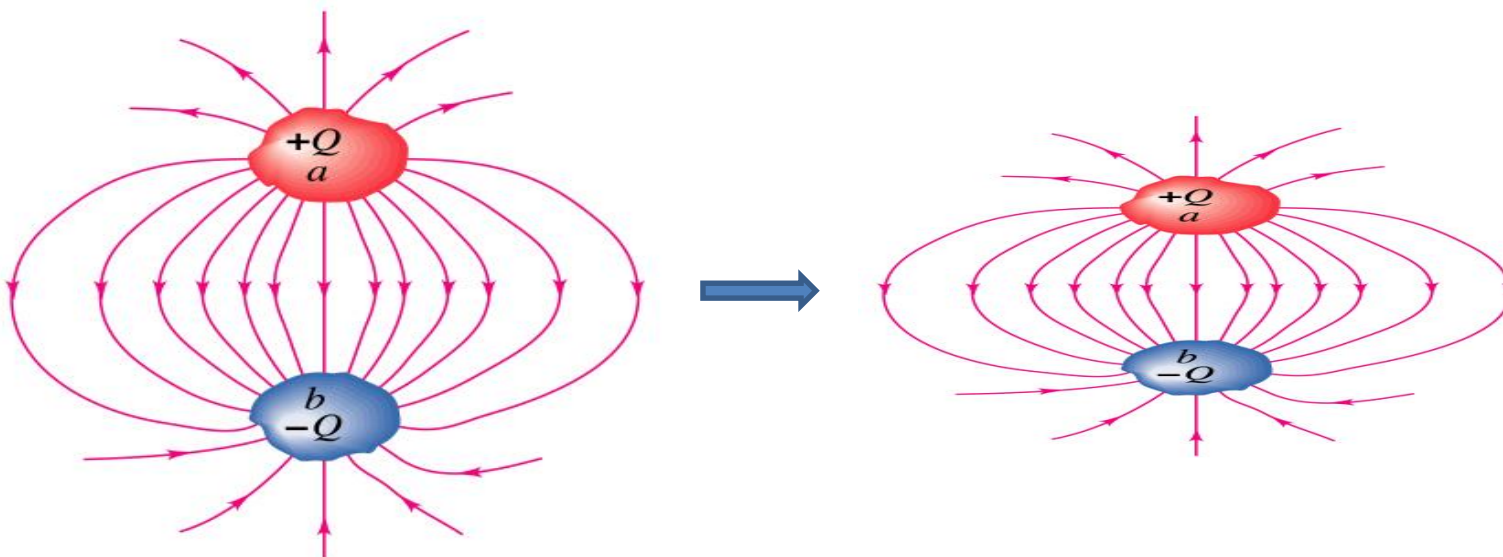
קיבול גדול של קבל מתאר מצב בו הקבל יכול לאכלס מטען רב ולמרות זאת המתח בין שני מוליכיו אינו גדול

שכן : $C \equiv \frac{Q}{V_{ab}}$

- אם נגדיל את ממדי הקבל מבלי לשנות את מטענו- צפיפות המטען המפולג על פני מוליכי הקבל-תקטן ולכן השדה הממוצע בין מוליכי הקבל יחלש ולכן גם מתח הקבל -יקטן. כלומר **הקיבול-יגדל**.



אם נקרב את מוליכי הקבל זה לזה (בתהליך קוואזיסטטי, כלומר תהליך איטי מאוד), ובנוסף נדאג שלא לשנות את מטען הקבל



נאלץ לבצע עבודה חיצונית שלילית (שכן מוליכי הקבל מושכים זה את זה ולכן עלינו להפעיל כוחות חיצוניים הפוכים לכיוון תזוזת המוליכים).

לפיכך- אנרגיית הקבל-תקטן ומכאן מתח הקבל יקטן (שכן : $U \equiv \frac{1}{2} Q V_{ab}$), והקיבול $C \equiv \frac{Q}{V_{ab}}$ - יגדל.

מסקנה כללית:

קיבול הקבל **גדל** ככל שממדיו גדולים יותר וככל שמוליכי הקבל קרובים יותר זה לזה.

◀ כדי לשנות את קיבולו של קבל יש לבצע עבודה חיצונית. נחשב עבודה זו עבור שני מקרים:

2. הקבל מחובר לסוללה.

העבודה החיצונית הדרושה לשינוי
קיבול הקבל כאשר הקבל
מחובר לסוללה.

במקרה זה - גם הסוללה מבצעת עבודה. שתי
העבודות יחדיו גורמות לשינוי אנרגיית הקבל. ולכן:

$$W_{\text{external}} + W_{\text{battery}} = \Delta U$$

$$V_0 \Delta Q \quad \frac{1}{2} V_0 \Delta Q$$

$$W_{\text{external}} = -\frac{1}{2} V_0 \cdot \Delta Q$$

$$V_0 (C_2 - C_1) \quad \Delta C$$

$$W_{\text{external}} = -\frac{1}{2} V_0^2 \cdot \Delta C$$

positive if $C_2 > C_1$

1. הקבל אינו מחובר לסוללה.

העבודה החיצונית הדרושה לשינוי
קיבול הקבל כאשר הקבל אינו
מחובר לסוללה.

עבודה זו תגרום לשינוי האנרגיה של
הקבל. מטען הקבל נשאר קבוע ולכן:

$$W_{\text{external}} = \Delta U = \frac{Q^2}{2C_2} - \frac{Q^2}{2C_1} = \frac{Q^2}{2} \left(\frac{1}{C_2} - \frac{1}{C_1} \right)$$

$$W_{\text{external}} = \frac{Q^2}{2} \left(\frac{1}{C_2} - \frac{1}{C_1} \right)$$

negative if $C_2 > C_1$

בשני המקרים העבודה החיצונית הדרושה להגדלת קיבול היא שלילית
ולהקטנת קיבול - חיובית.

◀ מחברים קבל לוחות שקיבולו C לסוללה והיא טוענת אותו במלואו למטען Q. שטח כל לוח של הקבל- A

המרחק בין לוחותיו-d.

א- מהו המתח בין לוחות הקבל ?

ב- מהו מתח הסוללה V_0 ?

ג- מהי אנרגיית הקבל U ?

ד- כמה עבודה W השקיעה הסוללה על מנת לטעון את הקבל אם מטענו לפני הטעינה היה אפס ?

ה- מהו היחס בין עבודת הסוללה לבין האנרגיה הפוטנציאלית החשמלית של הקבל. לאן "נעלם" ההפרש בין

עבודת הסוללה לבין אנרגיית הקבל ?

א- מתח הקבל : $V = \frac{Q}{C}$

ב- מתח הסוללה שווה למתח הקבל כאשר הוא טעון במלואו: $V_0 = V = \frac{Q}{C}$

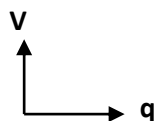
ג- אנרגיית הקבל: $U = \frac{Q^2}{2C}$

ד- עבודת הסוללה: $W = V_0 Q = \frac{Q^2}{C}$

ה- עבודה הסוללה כפולה מהאנרגיה הפוטנציאלית של הקבל. "עודף" העבודה הופך לחום ולקרינה

אלקטרומגנטית [המתרחשת כאשר חלקיקים טעונים מואצים].

◀ מחברים קבל לוחות שקיבולו C לסוללה בעלת מתח V_0 והיא טוענת אותו במלואו למטען Q . שטח כל לוח של הקבל- A המרחק בין לוחותיו- d .



א- שרטטו גרף **מתח-מטען** עבור הקבל במהלך טעינתו ע"י הסוללה :

ב- בחרו נקודה כלשהי על הגרף עבורה הקבל טעון במטען **חלקי** q . בחרו נקודה נוספת על הגרף עבורה

טעון הקבל במטען **חלקי**: $q+2q$ (הניחו כי $2q$ קטן מאד) . תארו בגרף זה את העבודה החלקית של

הסוללה בהעבירה את המטען $2q$ ואת תוספת האנרגיה הפוטנציאלית החשמלית של הקבל.

ג- על בסיס הגרף שבניתם בסעיף ב' חשבו את :

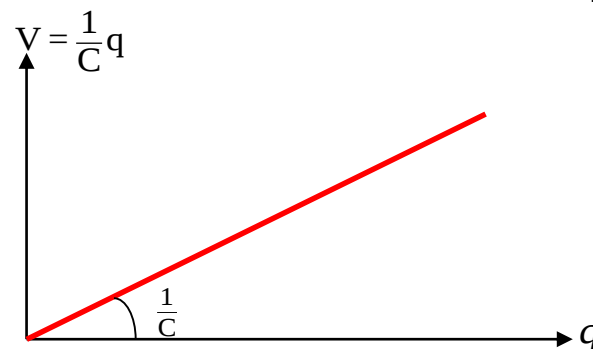
1. העבודה שתבצע הסוללה אם נחבר אליה קבל **הטעון מראש במטען** q . והיא תטען אותו עד מטען

מלא Q .

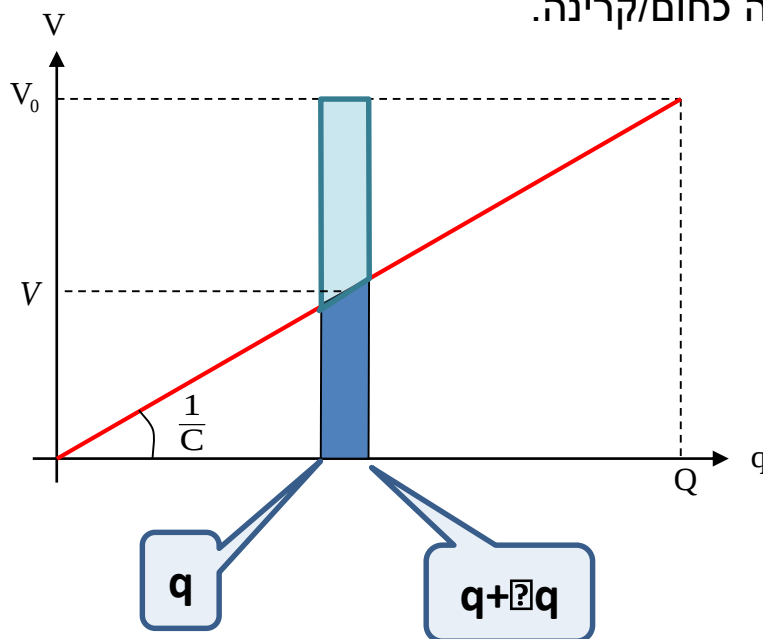
2. תוספת האנרגיה הפוטנציאלית החשמלית של הקבל כשהוא ממשיך להיטען מ q עד Q .

3. היחס בין עבודת הסוללה לבין תוספת האנרגיה הפוטנציאלית החשמלית של הקבל בתהליך זה.

א- הגרף :



ב- "שטח" הטרפז הכחול מייצג את תוספת האנרגיה של הקבל : $v \cdot \Delta q$. "שטח" המלבן (כחול+תכול) מייצג את עבודת הסוללה : $V_0 \cdot \Delta q$. ה"שטח" התכול מייצג את ההפרש בין עבודת הסוללה לבין תוספת האנרגיה של הקבל. הפרש זה נפלט לסביבה כחום/קרינה.



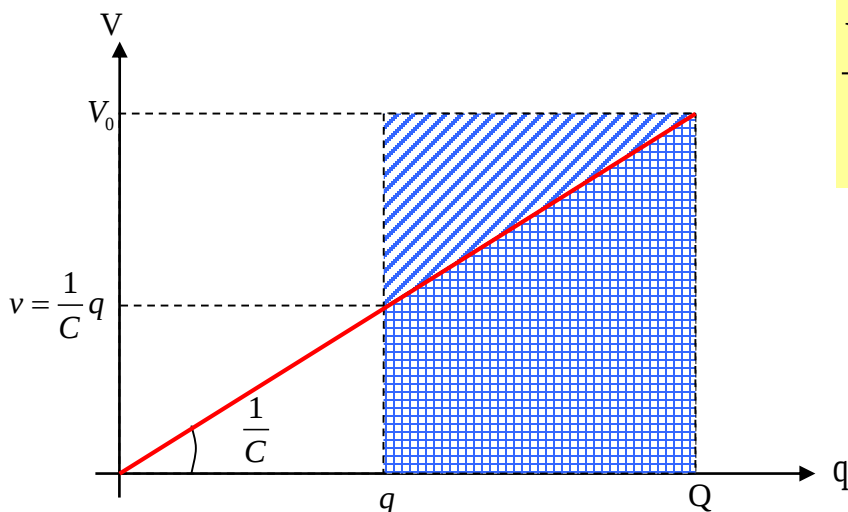
◀ **סעיף ג'-** אם נחבר אל הסוללה קבל הטעון מראש במטען q :

$$W_{\text{battery}} = V_0 \cdot (Q - q) = \frac{Q}{C} \cdot (Q - q)$$

1. עבודת הסוללה היא "שטח" המלבן:

2. תוספת האנרגיה של הקבל היא "שטח" הטרפז המשובץ:

$$\Delta U = \frac{(V_0 + v) \cdot (Q - q)}{2} = \frac{\frac{1}{C}(Q + q) \cdot (Q - q)}{2} = \frac{Q^2 - q^2}{2C}$$



$$\frac{W_{\text{battery}}}{\Delta U} = \frac{\frac{Q}{C} \cdot (Q - q)}{\frac{Q^2 - q^2}{2C}} = 2 \frac{Q}{Q + q}$$

3. היחס ביניהם :

ניתן לראות כי אם תהליך הטעינה היה מתחיל ממצב בו הקבל היה ריק (כלומר $q=0$) היחס היה 2:1 כפי שכבר ראינו בדוגמא (3).

◀ נתון קבל לוחות שקיבולו C_1 , המרחק בין לוחותיו d_1 , שטח כל לוח שלו A והוא טעון במטען Q הלוח השמאלי של הקבל-מוארק.

- א-** רשמו את פונקצית השדה החשמלי כתלות ב x ושרטטו את גרף הפונקציה.
- ב-** רשמו את פונקצית הפוטנציאל החשמלי כתלות ב x ושרטטו את גרף הפונקציה.
- ג-** חשבו את העבודה החיצונית שיש להשקיע (או לקבל) על מנת להקטין את קיבול הקבל מ C_1 ל C_2 כאשר הקבל אינו מחובר לסוללה.
- ד-** חשבו את העבודה החיצונית שיש להשקיע (או לקבל) על מנת להרחיק את לוחות הקבל למרחק d_2 ביניהם כאשר הקבל אינו מחובר לסוללה.
- ה-** חשבו את העבודה החיצונית שיש להשקיע (או לקבל) על מנת לשנות את קיבול הקבל מ C_1 ל C_2 כאשר הקבל מחובר לסוללה שטענה אותו בתחילה במטען Q .
- ו-** חשבו את העבודה שיש להשקיע (או לקבל) על מנת להרחיק את לוחות הקבל למרחק d_2 ביניהם כאשר הקבל מחובר לסוללה שטענה אותו בתחילה במטען Q .

סעיפים א' ו'ב'

השדה - עצמת השדה בתוך קבל לוחות טעון היא :

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{Q_1/A}{\epsilon_0} = \frac{Q_1}{A \cdot \epsilon_0}$$

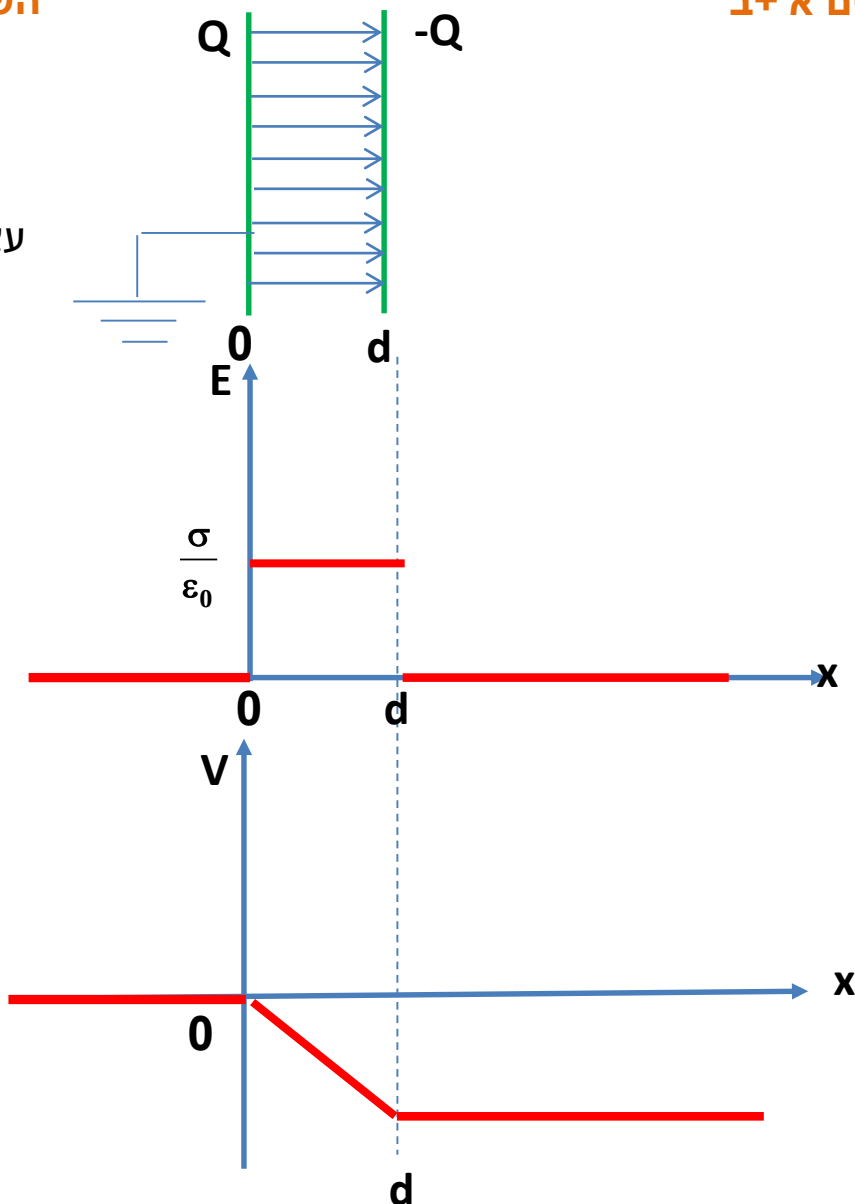
עצמת השדה מחוץ לקבל לוחות טעון הוא 0, לכן :

$$E(x) = \begin{cases} 0 & x < 0 \\ \frac{Q_1}{A\epsilon_0} & 0 < x < d \\ 0 & d < x \end{cases}$$

פוטנציאל - נזכור כי לא ניתן לבחור נקודת יחוס באינסוף

עבור פוטנציאל של גוף מוליך אינסופי. ההתייחסות שלנו אל קבל לוחות כאל קבל "אידאלי" שאין בו שפִּיית שדה היא התייחסות כאל לוחות "אינסופיים". נבחר פוטנציאל אפס על הלוח השמאלי :

$$V(x) = \begin{cases} 0 & x \leq 0 \\ -E \cdot x = -\frac{Q_1}{A\epsilon_0} x & 0 < x \leq d \\ -\frac{Q_1}{A\epsilon_0} d & d < x \end{cases}$$



העבודה החיצונית שיש להשקיע (או לקבל) על מנת לשנות את קיבול הקבל מ C_1 ל C_2 כאשר הקבל אינו מחובר לסוללה.

$$W_{\text{external}} = \Delta U = \frac{Q^2}{2C_2} - \frac{Q^2}{2C_1} = \frac{Q^2}{2} \left(\frac{1}{C_2} - \frac{1}{C_1} \right) = -\frac{Q^2}{2} \left(\frac{C_2 - C_1}{C_1 \cdot C_2} \right)$$

$$W_{\text{external}} = -\frac{Q^2}{2} \left(\frac{\Delta C}{C_1 \cdot C_2} \right)$$

◀ מסקנה:

כדי להקטין קיבול- (C שלילי)- עלינו להשקיע עבודה חיצונית חיובית כלומר- להגדיל את

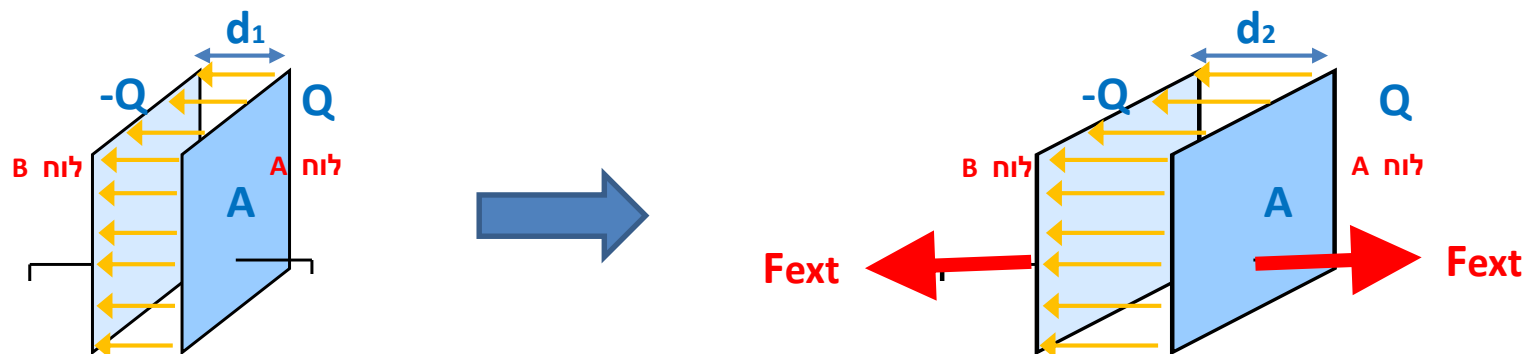
אנרגיית הקבל.

קצת מוזר, אבל נכון ואף הגיוני אם תחשבו על כך. כששני קבלים שונים טעונים באותו מטען $U = \frac{Q^2}{2C}$ דווקא הקבל בעל הקיבול הקטן אוגר יותר אנרגיה. ניתן להסיק זאת ישירות מנוסחת האנרגיה: ובנוסף- נמחיש זאת בסעיף ד'.

איננו אומרים כאן שקבל בעל קיבול קטן עדיף אנרגטית על קבל בעל קיבול גדול. נהפוך הוא. קיבול גדול עדיף משום יכולתו לאגור יותר אנרגיה ליחידת מתח $\left[U = \frac{1}{2} CV^2 \right]$ וזה מה שחשוב.

◀ סעיף ד'

העבודה החיצונית שיש להשקיע (או לקבל) על מנת להרחיק את לוחות הקבל למרחק d_2 ביניהם כאשר הקבל אינו מחובר לסוללה, כרוכה בהקטנת הקיבול מ C_1 ל: $\frac{1}{2} C_1$.



$$W_{\text{external}} = -\frac{Q^2}{2} \left(\frac{C_2 - C_1}{C_1 \cdot C_2} \right) = -\frac{Q^2}{2} \left(\frac{\frac{1}{2}C_2 - C_1}{C_1 \cdot \frac{1}{2}C_1} \right) = \boxed{+\frac{Q^2}{2 \cdot C_1}}$$

◀ כאשר מרחיקים את לוחות הקבל זה מזה יש להפעיל כוחות חיצוניים בכיוון תנועת הלוחות.

◀ עבודה זו היא חיובית והיא העבודה היחידה ולכן היא גורמת להגדלת אנרגיית הקבל וזאת למרות שהקיבול דווקא קטן.

◀ סעיף ה'

העבודה החיצונית שיש להשקיע (או לקבל) על מנת להקטין את קיבול הקבל מ C_1 ל C_2 כאשר הקבל מחובר לסוללה שטענה אותו בתחילה במטען Q :

◀ הסוללה שומרת על מתח קבוע V_0 .

$$W_{\text{external}} + W_{\text{battery}} = \Delta U$$

$$W_{\text{external}} + V_0 \Delta Q = \frac{1}{2} V_0 \Delta Q$$

$$W_{\text{external}} = -\frac{1}{2} V_0 \Delta Q = -\frac{1}{2} V_0^2 \Delta C$$

$$W_{\text{external}} = -\frac{1}{2} V_0^2 (C_2 - C_1)$$

$$W_{\text{external}} = -\frac{1}{2} V_0^2 \Delta C$$

◀ שימו לב שגם כשהקבל מחובר לסוללה העבודה החיצונית להקטנת קיבול היא חיובית ($C_2 < C_1$ שלילי), אבל כאן אנרגיית הקבל קטנה כשהקיבול קטן:

$$\Delta U = \frac{1}{2} V_0^2 \Delta C$$

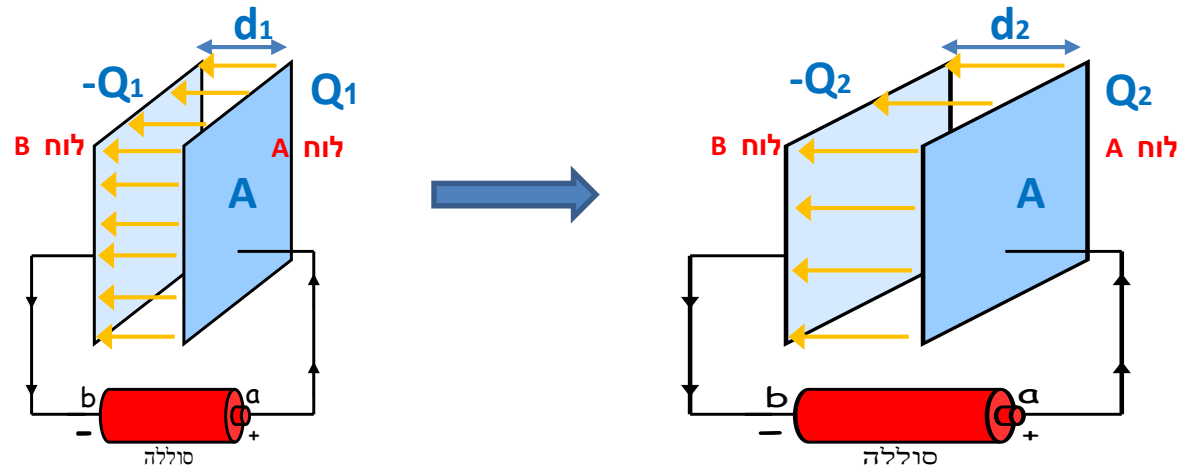
הסיבה לכך היא שהסוללה גורעת מטען מהקבל ומבצעת עבודה שלילית.

◀ סעיף ו'

העבודה שיש להשקיע (או לקבל) על מנת להרחיק את לוחות הקבל למרחק d_2 ביניהם כאשר הקבל מחובר לסוללה שטענה אותו בתחילה במטען Q_1 היא :

$$W_{\text{external}} = -\frac{1}{2}V_0^2\Delta C = -\frac{1}{2}V_0^2(c_2 - c_1) = -\frac{1}{2}V_0^2\left(\frac{\epsilon_0 A}{d_2} - \frac{\epsilon_0 A}{d_1}\right) = -\frac{V_0^2 \cdot \epsilon_0 \cdot A}{2}\left(\frac{1}{d_2} - \frac{1}{d_1}\right)$$

$$W_{\text{external}} = -\frac{V_0^2 \cdot \epsilon_0 \cdot A}{2}\left(\frac{1}{d_2} - \frac{1}{d_1}\right)$$

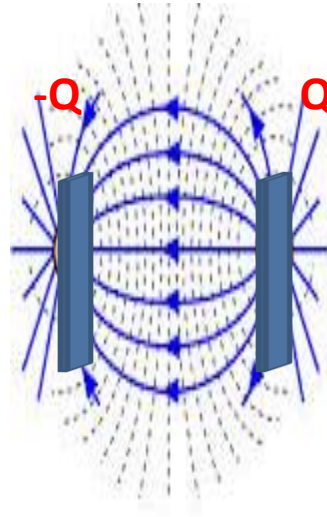


◀ כאשר מרחיקים את לוחות הקבל זה מזה יש להפעיל כוחות חיצוניים בכיוון תנועת הלוחות. ולכן העבודה החיצונית היא חיובית.

◀ אבל, אנרגיית הקבל קטנה כאשר מקטינים את הקיבול: $\Delta U = \frac{1}{2}V_0^2\Delta C$, (V_0 נשמר קבוע ואילו $C \downarrow$ שלילי). הסיבה היא-עבודה שלילית של הסוללה הגורעת מטען מהקבל. השדה החשמלי בין לוחות הקבל-קטן (ראו איורים).

◀ הוכיחו, על פי שיקולים אנרגטיים, שקיימת שפִייה של השדה החשמלי השׁוֹרר במרחב שבין שני לוחות של קבל לוח מעשי.

◀ שפִיית שדה (או אפקט קצוות) פירושה-דליפת שדה חשמלי גם מעבר לתווך שבין לוחות הקבל, כפי שניתן לראות באיור הבא:



◀ הערה :

אנחנו נוהגים להזניח את תופעת השפִייה ומתייחסים לקבל לוחות כאל קבל אידאלי. הזנחה זו מוצדקת אם לוחות הקבל קרובים מאוד זה לזה ושטח הלוחות-גדול. לעתים מציינים הזנחה זו באופן הבא: $d \ll \sqrt{A}$ כאשר d הוא המרחק בין הלוחות ו A הוא שטח כל לוח.

להוכחה זו ישנה חשיבות רבה בשל היותה בעלת אופי פיסיקלי מובהק ומעט לא שגרתית. הכוונה היא שהיא אינה מבוססת על חישובים מתימטיים מסובכים אלא על עקרון בסיסי בפיסיקה אשר על מנת לנצל אותו יש לחשוב "מחוץ לקופסא".

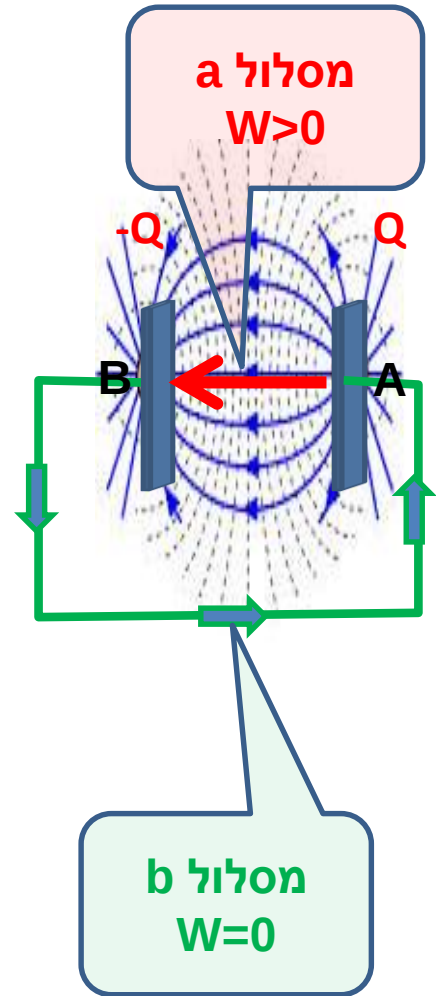
ההוכחה:

1. קבל טעון מהווה פילוג מטענים סטטי.
2. פילוג מטענים סטטי יוצר סביבו שדה חשמלי אלקטרוסטטי.
3. שדה חשמלי אלקטרוסטטי הוא שדה כוח משמר.
4. עבודתו (ליחידת מטען) של שדה אלקטרוסטטי משמר, על מטען בוחן העובר מנקודה A במרחב לנקודה B במרחב, אינה תלויה בצורת המסלול. כלומר תהיה בעלת ערך קבוע בכל מסלול העברה של מטען הבוחן מנקודה A אל נקודה B.
5. נצא מנקודת הנחה שאין שפיית שדה בקבל לוחות מעשי ונוכיח בדרך השלילה כי זה מצב בלתי אפשרי.
6. לכן, אם נצליח למצוא שני מסלולי העברה שונים, של מטען הבוחן מנקודה A אל נקודה B, בהם עבודת השדה תהיה שונה - הוכחנו בכך שמצב זה בלתי אפשרי ושפיית שדה אכן קיימת.

א- מסלול ראשון יהיה מסלול a (המסלול האדום)-בתוך הקבל מ A ל B. נסמן את עבודת השדה ב W_1 . במסלול זה קיים שדה שיבצע עבודה (חיובית) על מטען הבוחן. כלומר: $W_1 > 0$

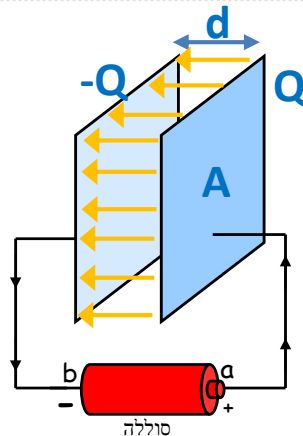
ב- מסלול שני יהיה מסלול b (המסלול הירוק)-מחוץ לקבל. נסמן את עבודת השדה ב W_2 . במסלול זה אין שדה חשמלי (בהנחה שאין שפיית שדה) ולכן: $W_2 = 0$.

ג- לא תתכן עבודת שדה שונה עבור שדה אלקטרוסטטי ולכן חייבת להיות שפיית שדה.



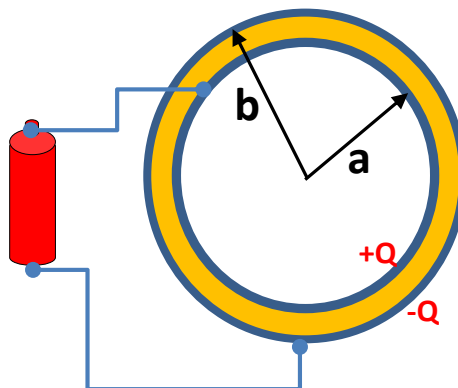
◀ סוגי קבלים:

1. קבל לוחות :



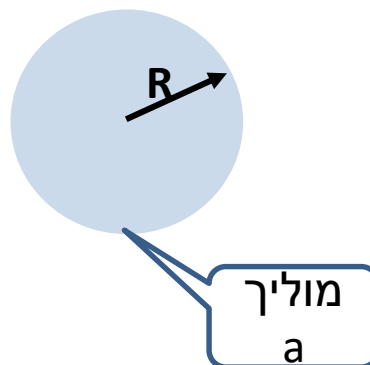
$$C = \frac{\epsilon_0 \cdot A}{d}$$

2. קבל כדורי :



$$C = \frac{ab}{k(b-a)}$$

3. כדור מוליך יחיד כקבל :



$$C = \frac{R}{k}$$

◀ שינוי קיבולו של קבל :

קיבול הקבל **גדל** ככל שממדיו גדולים יותר וככל שמוליכי הקבל קרובים יותר זה לזה.

◀ העבודה החיצונית הכרוכה בשינוי קיבולו של קבל:

1. העבודה החיצונית הדרושה לשינוי קיבול הקבל כאשר הקבל אינו מחובר לסוללה.

$$W_{\text{external}} = \frac{Q^2}{2} \left(\frac{1}{C_2} - \frac{1}{C_1} \right)$$

negative if $C_2 > C_1$

2. העבודה החיצונית הדרושה לשינוי קיבול הקבל כאשר הקבל מחובר לסוללה.

$$W_{\text{external}} = -\frac{1}{2} V_0^2 \cdot 4C$$

positive if $C_2 > C_1$

בשני המקרים העבודה החיצונית הדרושה להגדלת קיבול היא שלילית ולהקטנת קיבול-חיובית.