



פיסיקה תיכונית – חשמל

חלק ראשון – אלקטרוסטטיקה

ניר אדר

מסמך זה הורד מהאתר <http://underwar.livedns.co.il>.
אין להפיץ מסמך זה במדיה כלשהי, ללא אישור מפורש מאת המחבר.
מחבר המסמך איננו אחראי לכל נזק, ישיר או עקיף, שיגרם עקב השימוש במידע המופיע במסמך, וכן לנכונות התוכן של הנושאים המופיעים במסמך. עם זאת, המחבר עשה את מירב המאמצים כדי לספק את המידע המדויק והמלא ביותר.

כל הזכויות שמורות לניר אדר

Nir Adar

Email: underwar@hotmail.com

Home Page: <http://underwar.livedns.co.il>

אנא שלחו תיקונים והערות אל המחבר.

חוק קולון

הכוח הפועל על שני מטענים q_1, q_2 הנמצאים במרחק r זה מזה: $F = K \frac{q_1 q_2}{r^2}$ בין מטענים שווי סימן פועל כוח דחייה. בין מטענים שוני סימן פועל כוח משיכה.

$$K \begin{cases} K \approx 9 \cdot 10^9 \frac{m^2 \cdot N}{c^2} & m.k.s \\ K = 1 & c.g.s \end{cases} \text{ : שערךו, קבוע, } K$$

ב-M.K.S, מסמנים לעיתים גם:

$$K = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$$

$$\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$$

מטען אלמנטרי

e זהו המטען האלמנטרי, מטען של אלקטרון או פרוטון. כל המטענים האחרים הם כפולות של e .

$$e = \begin{cases} 1.6 \cdot 10^{-19} c & m.k.s \\ 4.8 \cdot 10^{-10} s.c & c.g.s \end{cases}$$

$$m_p = 1.67 \cdot 10^{-27} kg$$

$$m_e = 9.1 \cdot 10^{-31} kg$$

חומרים מוליכים ומבודדים

בחומר מוליך הרבה אלקטרונים החופשיים לנוע מאטום לאטום בחומר. בחומר מבודד מעט אלקטרונים חופשיים.

חוק שימור המטען החשמלי

במערכת סגורה, מערכת בה לא מתאפשרת כניסת/יציאת מטענים, המטען החשמלי הוא גודל נשמר.

השדה החשמלי

מציבים בנקודה כלשהי מטען בוחן חיובי קטן q_0 . אם פועל עליו כוח, קיים שדה חשמלי בנקודה. אם לא פועל עליו כוח, אין שדה חשמלי בנקודה.

אם הכוח הפועל על המטען הבוחן הוא \vec{F} , אזי:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0}$$

$$[E] = \begin{cases} \frac{N}{C} & m.k.s \\ \frac{Dinn}{s.c} & c.g.s \end{cases}$$

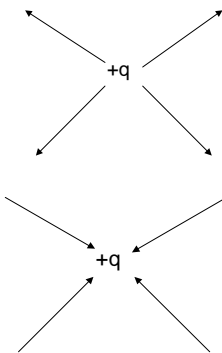
- במטען שלילי כיוון הכוח הפוך לכיוון השדה. במטען חיובי כיוון הכוח ככיוון השדה.

השדה החשמלי של מטען נקודתי

השדה החשמלי שיוצר מטען q בנקודה הנמצאת במרחק r ממנו:

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

אם q חיובי – כיוון השדה מהמטען והלאה.



אם q שלילי – כיוון המטען אליו פנימה.

הכוח הפועל על מטען q בשדה

הכוח הפועל על מטען q בשדה \vec{E} הוא $\vec{F} = q\vec{E}$

השדה החשמלי שיוצרים מספר מטענים בנקודה

$$\vec{E} = \sum_i \vec{E}_i \quad (\text{סכום ווקטורי})$$

עקרון הסופרפוזיציה

כאשר יש מערכת מטענים נקודתיים, השדה החשמלי השקול מתקבל על ידי הסכום הווקטורי של השדות החשמליים של כל מטען נקודתי.

דיפול חשמלי

דיפול חשמלי: שני מטענים נקודתיים $+q, -q$, הנמצאים במרחק קטן L זה מזה. הערה: כאשר מתרחקים מאוד ממטען נקודתי q השדה ישאף לאפס, היות והשדה קטן פי ריבוע המרחק. כאשר אנו מתרחקים מדיפול חשמלי, השדה שואף מהר יותר לאפס, כי כאשר $r \gg L$ יש נקודה שבה המטען הוא 0 (L המרחק בין המטענים זניח) ואז אין שדה.

שטף חשמלי

שטף השדה החשמלי דרך אלמנט שטח קטן: $\Delta\phi = E \cdot \Delta S \cdot \cos \alpha$, כאשר ΔS זהו שטח האלמנט, α זו הזווית בין כוון השדה לאנך לשטח.

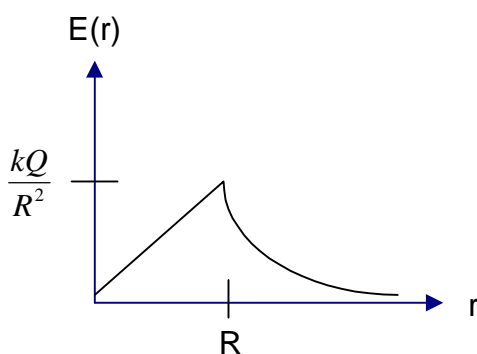
סה"כ השטף דרך משטח במרחב:

$$\phi = \sum_i E_i \cdot \Delta S_i \cdot \cos \alpha_i$$

משפט גאוס

במשטח סגור: $\phi = \frac{Q}{\epsilon_0}$. זהו סה"כ השטף דרך המשטח, Q זהו המטען הכולל הכלוא במשטח.

- אין חשיבות לאיזה משטח סגור בחרנו!

השדה החשמלי שיוצר כדור בעל מטען Q ורדיוס R במרחק r ממרכזו

$$E(r) = \begin{cases} \frac{kQ}{r^2} & r > R \\ kQ \frac{r}{R^3} & r < R \end{cases}$$

השדה החשמלי שיוצר תיל אינסופי במרחק r ממנו

$$E(r) = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \cdot \frac{\lambda}{r}$$

- $\lambda =$ צפיפות המטען האורכית

כיוון השדה הוא אנכית לתיל.

השדה החשמלי שיוצר משטח מישורי אינסופי טעון

$$E(r) = \frac{\sigma}{2\epsilon_0}$$

- σ היא צפיפות המטען המשטחית.
- כיוון השדה הוא ניצב למשטח.
- אין תלות במרחק מהמשטח.

מוליכים

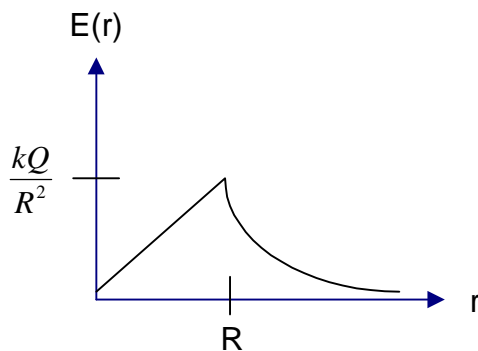
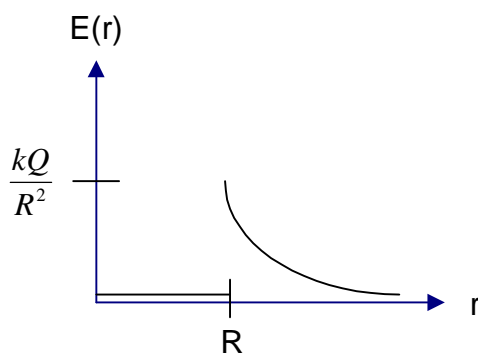
1. השדה החשמלי בתוך מוליך הוא אפס.
2. כל המטען העודף של מוליך נמצא על השפה החיצונית שלו.
3. השדה בסמוך לשפת המוליך ניצב לשפה וערכו $\frac{\sigma}{\epsilon_0}$. (מסקנה: ערך השדה גדול יותר היכן שהצפיפות גדולה יותר).

סיכום

גם בתוך מוליך שקיים בו חלל השדה החשמלי שווה לאפס. תופעה זו נקראת סיכום חשמלי. בצורה כזה ניתן להגן על משהו משדה חשמלי – לעטוף אותו במוליך.

השדה החשמלי של שני לוחות אינסופיים טעונים במטענים הפוכים

מחוץ ללוחות: $E=0$. בין הלוחות, $E = \frac{\sigma}{\epsilon_0}$.

כדור מבודדכדור מוליך

אנרגיה פוטנציאלית חשמלית

ניתן להגדיר אנרגיה פוטנציאלית חשמלית רק כשמדובר בכוח משמר. הכוח האלקטרוסטטי הוא כוח משמר.

הגדרה

האנרגיה הפוטנציאלית של שני מטענים נקודתיים הנמצאים במרחק r זה מזה:

$$U = K \frac{q_1 q_2}{r}$$

מטענים שוני סימן – המטענים נמשכים והאנרגיה שלילית.
מטענים שווי סימן – המטענים נדחים והאנרגיה חיובית.

האנרגיה הפוטנציאלית של מערכת מטענים נקודתיים

$$U = \sum_{\substack{i,j \\ i>j}} K \frac{q_i q_j}{r_{ij}}$$

משמעות: העבודה שנעשתה על מנת להביא את החלקיקים מהאינסוף אל המצב הנתון.

הפוטנציאל

הפוטנציאל בנקודה מסוימת מוגדר בתור האנרגיה הפוטנציאלית ליחידת מטען באותה נקודה. הפוטנציאל הוא גם העבודה הדרושה על מנת להביא יחידת מטען מהאינסוף אל אותה הנקודה. נסמן פוטנציאל ב V .

$$V = \frac{U}{q} \Rightarrow U = qV$$

הפוטנציאל שמטען נקודתי Q יוצר במרחק r ממנו

$$V(r) = \frac{kQ}{r}$$

המשמעות: אם נשים מטען q בנקודה שבמרחק r מ Q , האנרגיה הפוטנציאלית

$$\text{תהיה } K \frac{Qq}{r}$$

יחידות הפוטנציאל

$$[V] = \begin{bmatrix} \text{volt} & m.k.s \\ \text{stat.volt} & c.g.s \end{bmatrix}$$

$$300\text{volt} = 1\text{stat.volt}$$

הפוטנציאל של מערכת מטענים נקודתיים

$$V(r) = \sum \frac{kq_i}{r_i}$$

עבודה

העבודה שצריך להשקיע על מנת להסיע מטען q מנקודה a לנקודה b שבהן פוטנציאלים V_a, V_b (בלי לשנות את האנרגיה הקינטית) היא:

$$W_{a \rightarrow b} = qV_b - qV_a = q(V_b - V_a) = qV_{ba}$$

V_{ba} הוא הפרש הפוטנציאלים בין הנקודה b והוא נקרא מתח. יחידות המתח הן כיחידות הפוטנציאל.

$$V_{ba} = -V_{ab}$$

- חלקיק חיובי נע מפוטנציאל גבוה לפוטנציאל נמוך.
- חלקיק שלילי נע מפוטנציאל נמוך לפוטנציאל גבוה.

חלקיק q המואץ ממנוחה על פני מתח V (וללא השקעת עבודה מבחוץ) רוכש אנרגיה קינטית: $E_k = q \cdot V$

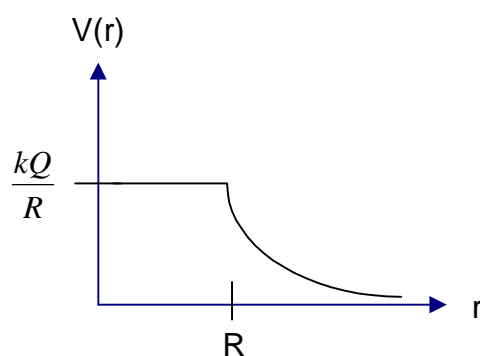
הקשר בין השדה החשמלי לבין הפוטנציאל

$$\vec{E}(r) = -\frac{dV}{dr} \hat{r}$$

(כאשר הפוטנציאל הוא פונקציה של r בלבד!).

בקבל לוחות שבו שדה חשמלי אחיד E קיים קשר בין המתח שבין הלוחות V_{ab} לבין השדה E והמרחק בין הלוחות d :

$$V_{ab} = E \cdot d$$

פוטנציאל של קליפה כדורית מוליכה ברדיוס R שמטענה Q :

$$V(r) = \begin{cases} \frac{kQ}{r} & r > R \\ \frac{kQ}{R} & r < R \end{cases}$$

כאשר מוליכים מובאים לידי מגע, עובר ביניהם מטען עד להשוואת הפוטנציאלים. מטען חיובי עובר מהפוטנציאל הגבוה לנמוך, אולם מה שקורה בפועל זה שאלקטרונים עוברים מהפוטנציאל הנמוך אל הגבוה.

הארקה

הארכה – חיבור מוליך לכדור הארץ.

גלגל שלכדור הארץ רדיוס גדול מאוד הפוטנציאל שלו $\frac{kQ}{R_E} = 0$. כשנחבר מוליך לכדור הארץ (הארקה) הפוטנציאלים ישתוו ולכן למוליך מוארק פוטנציאל 0. (זה לא אומר שהמטען והשדה הם 0!).

כאשר יש מוליך חיצוני ופנימי, ואין מוליכים אחרים, ויוצרים ביניהם מגע – כל המטען מהמוליך הפנימי עובר על המוליך החיצוני.

אנרגיה של מוליך כדורי טעון

לכדור מוליך ברדיוס R הטעון במטען Q אנרגיה פוטנציאלית חשמלית: $U = \frac{1}{2} \frac{KQ^2}{R}$. המשמעות: זוהי העבודה שהשקענו על מנת לטעון את הכדור במטען Q.

הכללה

כאשר עבור התקן מסוים ניתן לרשום $V(q)$ – פוטנציאל כפונקציה של המטען, אזי השטח הכלוא מתחת לגרף של $V(q)$ נותן את האנרגיה החשמלית הפוטנציאלית (אינטגרל).

קיבול

בהינתן שני מוליכים, האחד טעון במטען +Q והשני במטען -Q, הפרש הפוטנציאלים ביניהם (המתח) הוא V_{ab} . נסמן את הקיבול של המערכת ב C ונגדיר אותו בצורה הבאה:

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

$$[C] = \begin{bmatrix} F & m.k.s \\ cm & c.g.s \end{bmatrix}$$

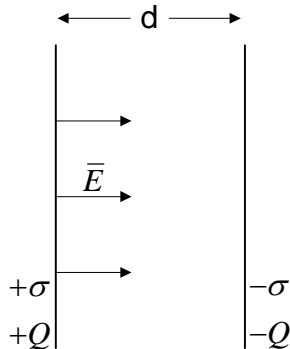
• הקיבול הוא תכונה גיאומטרית.

הגדרה נוספת

למוליך מבודד הנושא מטען Q יש פוטנציאל מסוים σ_0 יחסית לפוטנציאל אפס באינסוף. Q פרופורציוני ל σ_0 . קבוע הפרופורציה תלוי רק בגודל ובצורה של המוליך. לקבוע זה נקרא קיבול. $Q = C \cdot \sigma_0$.

קבל לוחות

שני לוחות מקבילים, טעונים בצפיפות מטען $+\sigma, -\sigma$. שה"כ המטענים על כל לוח הם $+Q, -Q$. המרחק בין הלוחות הוא d ושטח כל לוח הוא A .

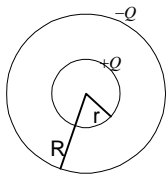


$$C = \epsilon_0 \cdot \frac{A}{d} : \text{הקיבול של קבל לוחות}$$

$$V_{ab} = E \cdot d = \frac{\sigma}{\epsilon_0} \cdot d : \text{פוטנציאל}$$

קבל כדורי

קבל כדורי הוא למעשה שתי קליפות כדוריות מוליכות משותפות מרכז.



$$C = \frac{1}{K} \frac{R \cdot r}{R - r} : \text{קיבול של קבל כדורי}$$

קיבול של כדור מוליך בודד

(אנחנו מניחים ש"הקליפה החיצונית" נמצאת באינסוף).

$$C = \frac{r}{K}$$

חיבור קבלים

חיבור קבלים בטור :

בחיבור קבלים בטור המטען על כל קבל שווה, ושווה גם למטען על הקבל השקול.

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}$$

חיבור קבלים במקביל :

בחיבור קבלים במקביל המתח על הקבלים שווה, ושווה גם למתח על הקבל השקול.

$$C = C_1 + C_2 + \dots + C_n$$

האנרגיה של קבל C הטעון במטען Q

$$U = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C} = \frac{1}{2} QV = \frac{1}{2} CV^2$$

הכוח בין לוחות קבל (קבל לוחות)

$$F = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{\epsilon_0 A} = \frac{1}{2} \frac{\sigma}{\epsilon_0} Q = \frac{1}{2} EQ$$

שינוי קיבול

אם בזמן השינוי הקבל נשאר מחובר למקור המתח אזי המתח על פני הקבל נשאר קבוע.
אם השינוי מתבצע לאחר שהקבל נטען ונותק ממקור המתח אזי המטען של הקבל נשאר קבוע.

חומרים דיאלקטריים

חומר דיאלקטרי (דיאלקטריקון) – חומר מבודד המוכנס בין לוחות הקבל.
הכנסת דיאלקטריקון בין לוחות הקבל מגדילה את קיבולו.

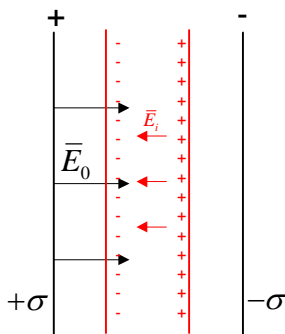
$$\frac{C_{\text{with dialektron}}}{C_{\text{vacum}}} = \epsilon_r$$

ϵ_r זהו המקדם הדיאלקטרי היחסי.
 $\epsilon_r > 1$ (ϵ_r של וואקום הוא 1).

קיבול של קבל לוחות עם דיאלקטריקון:

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

כאשר מכניסים בין הלוחות תווך דיאלקטרי, התווך עצמו נהיה מקוטב, ולכן, בתוך התווך עצמו נוצר שדה חשמלי שכיוונו הפוך לכיוון השדה החשמלי של הקבל:



השדה בקבל עם הדיאלקטרון:

$$E = E_0 - E_i$$

כאשר E_0 זהו השדה ללא הדיאלקטרון ו E_i זהו השדה המושרה.

תוצאות מהכנסת דיאלקטרון

- המטען על הלוחות לא משתנה.
- הקיבול של הקבל משתנה. $C = \epsilon_r \cdot C$
- השדה קטן פי ϵ_r : $E = \frac{E_0}{\epsilon_r}$
- המתח קטן פי ϵ_r : $V = \frac{V_0}{\epsilon_r}$
- הקיבול עם הדיאלקטריקון לא תלוי במיקום הדיאלקטריקון (מרחקו מכל לוח), אבל כן תלוי בעוביו של הדיאלקטריקון.

מערכת קבלים שלא ניתן להציגם כחיבורים בטור או במקביל בלבד, ניתן לפתור בשתי דרכים:

1. משיקולי סימטריה.
2. יצירת משוואות על פי שני העקרונות הבאים:
א. המתח בין כל שתי נקודות שווה לאורך כל המסלולים.
ב. סה"כ המטען בענף עצמאי = 0.

הספק

נסמן הספק באות P:

$$P = F \cdot V$$

$$P = \frac{dw}{dt}$$