חשמל ומגנטיות - תרגול 9

זרמים והתנגדות

- כאשר בין קצותיו של מוליך יש מפל מתח, מטען יחל לזרום במוליך. צפיפות הזרם מוגדרת להיות:

$$\boxed{\vec{j}(\vec{r})=\rho(\vec{r})\cdot\vec{V}(\vec{r})}$$

כאשר $\rho(\vec{r})$ הינו צפיפות המטען החשמלי בנק' $\vec{r}$
ו- $\vec{V}(\vec{r})$ הינו המהירות של אלמנט מטען בנקודה $\vec{r}$.

- היחידות של צפיפות הזרם הן, אם כן, מטען חלקי שטח חלקי זמן:

$$[j]=[\rho\cdot v]=\left[\frac{Q}{L^3}\right]\cdot\left[\frac{L}{t}\right]=\left[\frac{Q}{L^2\cdot t}\right]$$

- ביחידות M.K.S., זה קולון למטר בריבוע לשניה $[j]=\frac{C}{m^2\cdot s}$

- המשמעות של צפיפות הזרם הינו כמות המטען ליחידת שטח, ליחידת זמן הזורם במוליך, $\boxed{|j|=\frac{dQ}{ds\,dt}}$

- הזרם הכולל דרך משטח מסויים מוגדר ככמות המטען החוצה את המשטח ליחידת זמן. זו בדיוק השטף הכולל של $\vec{j}$ דרך המשטח:

$$\boxed{I=\oint\!\!\oint_S \vec{j}\cdot d\vec{s}=\frac{dQ}{dt}}$$

- בשיטת MKS, לזרם הכולל I יש יחידות של אמפר (Ampére) שמסומן באות A. לפי ההגדרה: $1A=1\frac{C}{sec}$

ביחידות c.g.s., ל- I יש יחידות של $\frac{e.s.u.}{sec}$

- אילו המטענים בחומר היו חופשיים לחלוטין, הרי שבהשפעת השדה הם היו מאיצים, והזרם היה עולה באופן מונוטוני עם הזמן! למעשה, בשל התנגשויות פנימיות (לדוגמא, עם

פעמים במבנה הסריג), המטענים מגיעים למהירות ממוצעת קבועה, ולכן גם לזרם קבוע, הפרופורציונאלי לשדה. ראיתם בהרצאה מודל לתופעה זו הנקרא מודל דרודה, אך לא נחזור כאן על הפיתוח.

- הקשר בין הזרם לשדה נקרא חוק אוהם:

$$\boxed{\vec{j} = \sigma \vec{E}}$$

כאשר σ היא המוליכות החשמלית של החומר, ה"חוקית" לכל חומר (בד"כ, σ תלויה בתנאים כגון טמפרטורה, אבל לא ניכנס לזה כאן).
שימו לב כי זהו חוק אמפירי ולא חוק טבע. יש בעולם חומרים שמתנהגים בצורה לא אוהמית.

- ישנו ניסוח נוסף של חוק אוהם, שהוא לעיתים שימושי יותר. כדי לקבל אותו, נניח לשם פשטות כי המוליך הוא גוף בעל מוליכות σ קבועה, שטח חתך A ואורך L, ושהשדה קבוע לאורכו. אזי:

$$\boxed{I} = \iint_S \vec{j}\cdot d\vec{s} = \iint \sigma \vec{E}\, d\vec{s} = \sigma E\cdot A = \boxed{\sigma A\cdot \frac{V}{L} \equiv \frac{V}{R}}$$

כאשר השתמשנו בכך שהשדה קבוע ולכן הפרש הפוטנציאלים (המתח) לאורך המוליך הוא $V = E\cdot L$

והגדרנו את ההתנגדות של המוליך:

$$\boxed{R \equiv \frac{L}{A\sigma} \equiv \rho_0 \frac{L}{A}} \qquad R \equiv \text{Resistance}$$

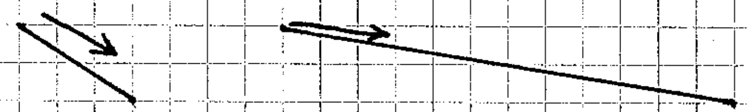
הגודל $\rho_0 \equiv \frac{1}{\sigma}$ נקרא ההתנגדות הסגולית של החומר.

- R מבטא את ההתנגדות של המוליך לזרם חשמלי, כי בהינתן מתח V, הזרם I קטן ככל ש-R גדל.

שימו לב שבהינתן התנגדות סגולית ρ_0, R גדל ככל ששטח החתך A קטן. הדבר דומה לזרם של מים דרך צינור. ככל ששטח החתך של הצינור קטן יותר, יותר קשה למים לזרום דרכו.

R גדל גם עם אורך המוליך L. כמו בצינור מים שנמצא בשיפוע, ולכן המים מאיצים בגלל הגרביטציה, בהינתן הפרש גבהים בצינור (האנלוגי להפרש פוטנציאלים V), זרימת המים איטית יותר (הזרם החשמלי I חלש יותר) ככל שהצינור ארוך יותר ולכן השיפוע קטן יותר (R גדל עם L)

<u>אנלוגיית המים:</u>



- שימו לב שהנוסחאות עבור ההתנגדות R והקיבול C אנלוגיות לחלוטין, תחת החילוף ש: R מייצג <u>התנגדות</u> לזרם (בהינתן הפרש פוטנציאלים V) ואילו C מייצג <u>היענות</u> לקבלת מטען:

$$\boxed{Q = C\cdot V, \quad I = \frac{1}{R}\cdot V}$$

- היחידות של R בי MKS הן <u>אוהם</u> $\boxed{\text{Ohm} \equiv \Omega}$

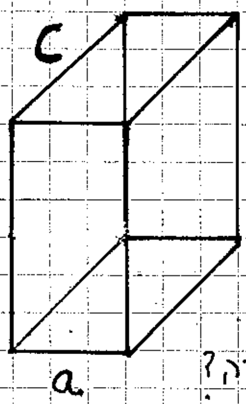
$$[R] = \frac{[V]}{[I]} = \frac{\text{Volt}}{\text{Ampere}} = \Omega$$

$$[\rho_0] = [R]\cdot\frac{[A]}{[L]} = \Omega\cdot m$$

$$[\sigma] = \frac{1}{[\rho_0]} = \frac{1}{\Omega\cdot m}$$

דוגמא I: נגד תיבה

נתון נגד בצורת תיבה, שאורך פיאותיו a, b, c, והוא בעל מוליכות קבועה σ.



נחבר אותו לאותו מתח, כאשר כל פעם שתי פיאות מנוגדות מחוברות להדקים של מקור המתח.

מהי התנגדות התיבה בכל מקרה?

פתרון

מקודם, ראינו שעבור מוליך עם σ קבוע, שטח חתך A ואורך L, שהשדה החשמלי $\vec{E}$ קבוע בתוכו, ההתנגדות היא: $R = \frac{1}{\sigma} \cdot \frac{L}{A}$.

באופן כללי, נגדיר את הקורדינטה (x) לאורך הכיוון שמחבר בין ההדקים (שלאורכו יש את מפל המתח V), נחלק את המוליך להרבה פיאות אינפיניטסימליות בעובי dx, עם שטח חתך $A(x)$ ומוליכות קבועה $\sigma(x)$ ונקבל:

$$\boxed{R = \int_0^L \frac{dx}{\sigma(x) A(x)}}$$

בדוגמא הנ"ל, σ קבוע בכל המוליך, ושטח החתך לא תלוי במיקום. כך נקבל עבור שלושת המקרים:

$$R = \frac{1}{\sigma} \cdot \frac{c}{ab}, \quad \frac{1}{\sigma} \frac{b}{ac}, \quad \frac{1}{\sigma} \frac{a}{bc}$$

מסקנה: ההתנגדות הכוללת של הגוף תלויה לא רק בגוף עצמו, אלא גם באיך מחברים אותו למקור המתח!

משוואת הרציפות

מטען חשמלי הוא גודל שמור, שלא יכול להופיע או להיעלם.
זו אחת האקסיומות החשובות של הפיסיקה (למעשה, ע"י
הנחות אחרות, ניתן ממש להוכיח שמטען חשמלי הוא גודל שמור
ואת זה לומדים בקורסים מתקדמים בתורת השדות
הקוונטים). לכן סך המטען החשמלי בכל מערכת חייב
להישמר. יתרה מזאת, המטען נשמר באופן לוקאלי,
כלומר הוא לא יכול להיעלם ממקום אחד ולהופיע במקום
אחר, אלא הוא חייב לזרום לשם.

הדבר הזה אומר שהשינוי בצפיפות המטען יכול לנבוע
רק ממקורות של זרם חשמלי.
נסתכל בנפח V הסגור במעטפת S. נניח שיוצא
ממנו זרם, כך שסך המטען בנפח $Q(t)$ שווה למינוס
המטען הזורם החוצה (התחלנו עם מטען נטו בנפח).
כלומר:

$$\frac{dQ}{dt} = -\oint\!\!\oint_S \vec{j}\cdot d\vec{S}$$

אם נבטא את המטען באמצעות הצפיפות ρ, ונשתמש
במשפט הדיברגנץ נקבל:

$$\frac{d}{dt}\iiint_V \rho\, dV = -\iiint_V \vec{\nabla}\cdot\vec{j}\, dV$$

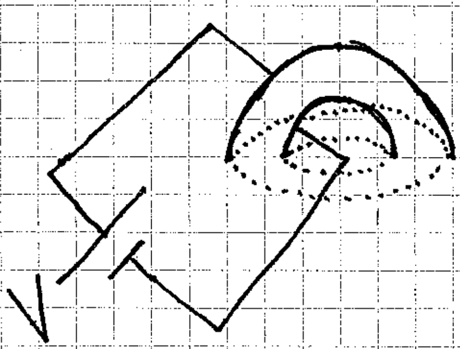
הואיל וזה נכון לכל נפח שרירותי V, נסיק שבאופן
כללי מתקיים:

$$\boxed{\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla}\cdot\vec{j} = 0}$$

למשוואה זו קוראים משוואת הרציפות, והיא כאמור מתארת
שימור מטען באופן לוקאלי.

דוגמא II: קליפה חצי כדורית

נתונה קליפה חצי כדורית בעלת רדיוסים $a<b$ ובעלת מוליכות אחידה σ. מחברים מתח V בין החלק הפנימי לבין החלק החיצוני. מהי התנגדות המערכת?



פתרון

מתוך סימטריית הבעיה, ברור שהזרם יהיה רדיאלי.
מתוך שימור מטען, נובע כי הזרם העובר דרך כל קליפה כדורית היא קבועה, שכן כל המטענים שיוצאים ביחד מקליפה אחת אל עבר הקליפה הבאה, חייבים לחצות גם אותה ביחד, כי מטענים לא מופיעים או נעלמים בדרך (לא משאירים מטענים בשטח!)

לכן: $$I(r) = I = 2\pi r^2 \cdot j(r)$$

(השתמשנו בכך ש: $\vec{S} = 2\pi r^2 \hat{r}$, $\vec{j} = j(r)\hat{r}$)

לכן: $$\boxed{\vec{j}(r) = \frac{I}{2\pi r^2}\hat{r}}$$

ואכן: $$\vec{\nabla}\cdot\vec{j} = \frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial r}\left(r^2 j(r)\right) = 0 \Longrightarrow \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$$

$\Downarrow$

מטען לא מצטבר בתוך הקליפה!

מתוך חוק אוהם הלוקאלי נקבל: $$E(r) = \frac{I}{2\pi r^2 \sigma} = \frac{j(r)}{\sigma}$$

לכן המתח הוא:

$$V=\left|-\int_a^b E_{(r)}\,dr\right|=\left|-\frac{I}{2\pi\sigma}\int_a^b \frac{1}{r^2}\,dr\right|$$

$$V=\frac{I}{2\pi\sigma}\cdot\left(\frac{1}{a}-\frac{1}{b}\right)\Longrightarrow\boxed{R=\frac{V}{I}=\frac{1}{2\pi\sigma}\left(\frac{1}{a}-\frac{1}{b}\right)}$$

שיטה שנייה לפתרון: לפי ההגדרה

$$R=\int_a^b\frac{dr}{\sigma_{(r)}A_{(r)}}$$

$$\boxed{R}=\int_a^b\frac{dr}{\sigma\cdot 2\pi r^2}=\boxed{\frac{1}{2\pi\sigma}\left(\frac{1}{a}-\frac{1}{b}\right)}$$

כמו מקודם!

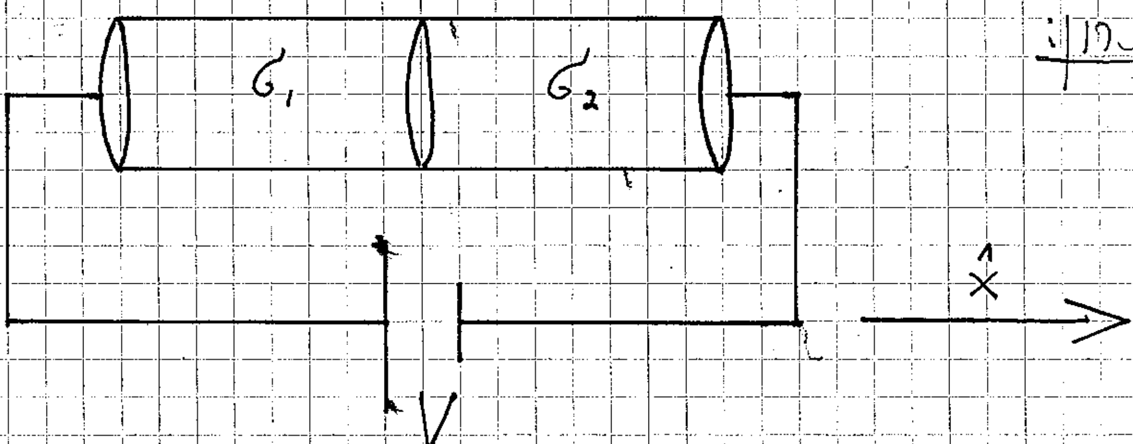
דוגמא III: נגדים עם מוליכות שונה:

2 גלילים זהים מחוברים זה לזה בבסיסם, ומחברים את הבסיסים הנותרים למקור מתח. לכל גליל מוליכות סגולית קבועה, אך המוליכות של כל גליל שונה.

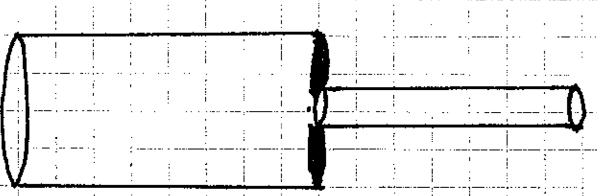
(א) מהו השדה החשמלי בכל נגד?

(ב) האם יצטברו מטענים במקום כלשהו במרחב?

פתרון:



שימו לב שאם נחזור לאנלוגיה של זרימת מים בצינור, הרי שהדבר דומה לשני צינורות עם שטח חתך שונה שמחוברים בטור אחד לשני.



במקרה כזה, אנחנו מצפים שתהיה הצטברות של מים במעבר בין הצינור הרחב לצינור הדק, שכן הגיעו לפתח יותר מים ממה שיכול להיכנס לפתח. נראה איך זה בא לידי ביטוי:

(א) לפי סימטריית הבעיה, השדה החשמלי יהיה בכיוון ציר הגלילים, ולפי משוואת הרציפות צפיפות הזרם תהיה קבועה בתוך הגלילים ושווה ל: $\vec{j} = \frac{I}{A}\hat{x}$

(I חייב להיות קבוע במצב עמיד, ונתון ששטחי הגלילים זהים).

לעומת זאת, השדות לא יהיו זהים ויתקיים

$$\boxed{\vec{E}_{1,2} = \frac{I\hat{x}}{\sigma_{1,2}\cdot A}}$$

(ב) המסקנה היא שעל המשטח המחבר בין הגלילים יש הצטברות מטען. נסמן את צפיפות המטען המשטחית ב- Σ ונקבל מתנאי הקפיצה של השדה החשמלי:

$$4\pi K\cdot\Sigma = -E_1 + E_2 = \frac{I}{A}\left(\frac{1}{\sigma_2}-\frac{1}{\sigma_1}\right) \longrightarrow$$

מעטפת גאוס גלילית

$$4\pi K q_{inside} = \left(\vec{E}_1\cdot(-\hat{x}) + \vec{E}_2\cdot\hat{x}\right)\cdot A$$

$$\boxed{\Sigma = \frac{\varepsilon_0 I}{A}\left(\frac{1}{\sigma_2}-\frac{1}{\sigma_1}\right)}$$

שימו לב ש- Σ קבוע בזמן. לא מדובר על מטען שהולך ומצטבר על הדופן, אלא במטען שנצבר שם בהתחלה ומאותו רגע המצב הוא עמיד (סטציונרי).

(אותו דבר נכון גם למעבר של מים בין 2 הצינורות למעלה).

שים לב שמכיוון שמגדירים $I = A\cdot\vec{j} = A\cdot\rho\cdot\vec{V}$

אז כיוון הזרם מוגדר להיות כיוון תנועת המטענים החיוביים. זה מסיבות היסטוריות בלבד, ובפועל המטענים נושאי הזרם הם שליליים, אלקטרונים.

למרות זאת, בדוגמא שלנו, אם $0 < I$ אז זה אומר שמטענים חיוביים נעים בכיוון $\hat{x}$, מהנגד עם σ_1, לנגד עם σ_2.

נניח כי $\sigma_1 > \sigma_2$, כלומר לנגד השני יש יותר התנגדות לזרם. אנו מצפים שמטענים חיוביים "יצטברו" במעבר בין σ_1 ל- σ_2, כמו שמכוניות מצטברות בכניסה לפקק תנועה.

ואכן, אם $I > 0$, $\sigma_1 > \sigma_2$ $\Longleftarrow$ $\Sigma > 0$

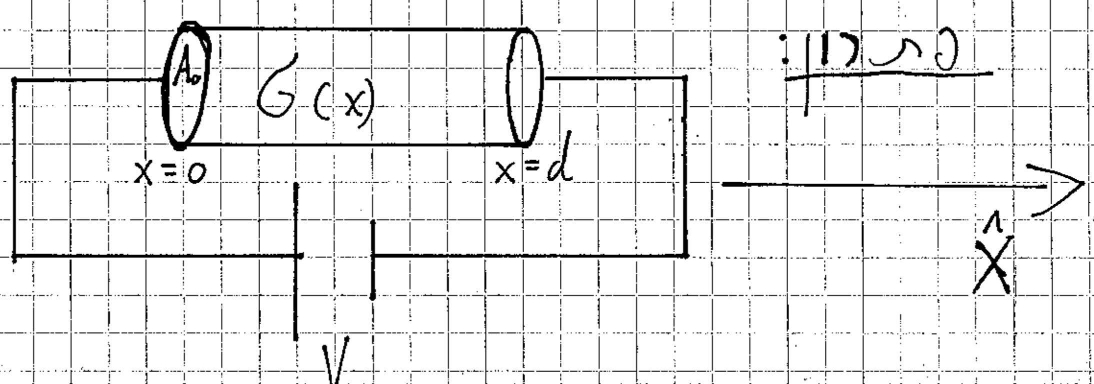
דוגמא IV:

נתון נגד עם שטח חתך קבוע A_0 ואורך d, שהמוליכות שלו נתונה ע"י $\sigma(x) = \sigma_0\left(1+\frac{x}{d}\right)$

את הנגד מחברים למקור מתח V באמצעות תיל שניתן לקרב אותו למוליך "אידיאלי" (עם מוליכות $\sigma \gg \sigma_0$)

במצב עמיד, מהו המטען הכולל שבו טוען הנגד?

פתרון:



משימור מטען (מצב עמיד), $I = const$ במעגל. בתוך הנגד:

$$\vec{j} = \frac{I}{A_0}\hat{x} = const \Longleftarrow \vec{j}(x) = \frac{I(x)}{A(x)}\hat{x} = \frac{I}{A_0}\hat{x} = const$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\vec{\nabla}\cdot\vec{j} = 0$$ זה אכן מתאר מצב עמיד שבו

<u>חוק אוהם:</u>

$$\vec{E} = \frac{1}{\sigma}\vec{j} = \frac{I}{A_0\sigma_0\left(1+\frac{x}{d}\right)}\hat{x}$$

<u>חוק גאוס:</u>

$$\vec{\nabla}\cdot\vec{E} = \frac{\rho_{(x)}}{\varepsilon_0} = \frac{\partial E_x}{\partial x} + \frac{\partial E_y}{\partial y} + \frac{\partial E_z}{\partial z}$$

$$\Downarrow$$

$$\boxed{\rho_{(x)} = -\frac{\varepsilon_0 I}{A_0\sigma_0 d}\cdot\frac{1}{\left(1+\frac{x}{d}\right)^2}}$$

שימו לב שעבור $I>0$ מקבלים $\rho<0$ בתוך הנגד.
במקרה זה, מטענים חיוביים נעים בכיוון $\hat{x}$ מאזור עם מוליכות נמוכה (התנגדות גבוהה) לאזור עם מוליכות גבוהה (התנגדות נמוכה).
הדבר דומה לפקק שמשתחרר.
עוד נשים לב שבערך מוחלט, $|\rho|$ קטן ככל ש-x גדל, כלומר ככל ש-σ גדלה.

סה"כ, בתוך הנגד:

$$Q_{in} = A\cdot\int_0^d \rho_{(x)}dx = \frac{\varepsilon_0 I}{\sigma_0 d}\cdot\frac{d}{1+\frac{x}{d}}\Bigg|_0^d$$

$$\boxed{Q_{in}} = \frac{\varepsilon_0 I}{\sigma_0}\left[\frac{1}{2}-1\right] = \boxed{-\frac{\varepsilon_0 I}{2\sigma_0}}$$

<u>אבל</u>, גם מצטבר מטען על השפות. בגלל שנתון כי המוליך החיצוני הוא אידיאלי, נוכל לקחת $E=0$ מחוץ למוליך ולקבל מחוק גאוס האינטגרלי:

$$\boxed{Q_{(x=0)}} = \varepsilon_0\cdot\vec{E}_{(x=0)}\cdot(A_0\hat{x}) = \boxed{\frac{\varepsilon_0 I}{\sigma_0}} > 0$$ (כמו מקודם, אם $\sigma_2=\sigma_0$, $\sigma_1=\infty$)

$$\boxed{Q_{(x=d)}} = \varepsilon_0\cdot\vec{E}_{(x=d)}\cdot(A_0(-\hat{x})) = \boxed{-\frac{\varepsilon_0 I}{2\sigma_0}}$$

נטו המטען על הנגד: $\boxed{Q_{tot}} = Q_{in} + Q_{(x=0)} + Q_{(x=d)} \boxed{=0}$

נטו לא הצטבר מטען **על הנגד**!

(אם לא היינו מניחים שהשדה מתאפס מחוץ לנגד, אז כן היינו מקבלים נטו מטען)

דוגמא V (מועד ב׳, 2010, שאלה 4)

גליל אינסופי חלול, עם רדיוסים $R_1 < R_2$, מורכב מחומר בעל מקדם דיאלקטרי ε ומוליכות σ.
הגליל טעון בזמן $t=0$ בצפיפות אחידה ρ_0.
השפה החיצונית של הגליל מוארקת (מחוברת לאדמה באמצעות מוליך אידיאלי).

(א) מהי צפיפות המטען המרחבית $\rho_{(t)}$?

(ב) מהו השדה החשמלי כתלות בזמן $\vec{E}_{(t)}$?

פתרון

(א) קודם כל, ברור שמצב זה אינו עמיד, ומתקיים $\frac{\partial \rho}{\partial t} \neq 0$, שכן התחלנו עם כמות מטען סופית שזורמת דרך המערכת.

מטען זה הינו חופשי, ולכן $\vec{\nabla}\cdot\vec{D} = \rho_f$

כמו כן, $\vec{D} = \varepsilon \vec{E}$ כאשר $\varepsilon = const$.

לכן: $\vec{\nabla}(\varepsilon\vec{E}) = \varepsilon\cdot\vec{\nabla}\cdot\vec{E} = \rho_f$

$$\boxed{\vec{\nabla}\cdot\vec{E} = \frac{\rho_f(t)}{\varepsilon}}$$

מצד שני: $\boxed{\vec{\nabla}\cdot\vec{J} = \frac{\sigma}{\varepsilon}\rho_{(t)}} \Leftarrow \vec{E} = \frac{1}{\sigma}\vec{J}$ חוק אוהם

רצות ממשוואות הרציפות:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\vec{\nabla}\cdot\vec{j} = -\frac{\sigma}{\varepsilon}\rho$$
$$\Downarrow$$
$$\boxed{\rho_{(t)} = \rho_0 e^{-\frac{\sigma}{\varepsilon}t}}$$

ב

$$\vec{\nabla}\cdot\vec{E} = \frac{\rho_{(t)}}{\varepsilon}$$

מהסימטריה של הבעיה, השדה הוא רדיאלי ותלוי רק ב- r

$\vec{E}_{(\vec{r})} = E_{(r)}\hat{r}$. נבנה מעטפת גאוס גלילית ברדיוס r

ונקבל, עבור $R_1 < r < R_2$

$$E_{(r)}\cdot 2\pi r\cdot L = \frac{Q_{inside}}{\varepsilon} = \frac{\pi(r^2-R_1^2)\cdot L\cdot\rho_{(t)}}{\varepsilon}$$

ε, לא ε_0 !!

$$\Downarrow$$
$$\boxed{\vec{E}_{(r)} = \frac{r^2-R_1^2}{2\varepsilon r}\rho_0 e^{-\frac{\sigma}{\varepsilon}t}\hat{r}}$$

• עבור $r<R_1$, כמובן שמתקיים $\vec{E}=0$, כי $Q_{inside}=0$

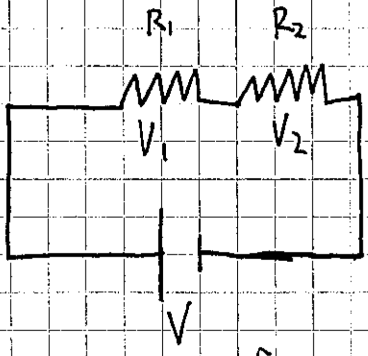
• עבור $R_2<r$, זה תלוי במוליך שמחבר להארקה, אם באמת מדובר במוליך אידיאלי עם $\sigma=\infty$, אזי מחוץ לגליל $E=0$. למעשה, יצטבר על השפה החיצונית של הגליל

צפיפות מטען:
$$\Sigma = \varepsilon\cdot\vec{E}_{(r=R_2)}\cdot(-\hat{r}) = -\frac{R_2^2-R_1^2}{2R_2}\cdot\rho_{(t)}$$
$$\Downarrow$$
$$Q_{surface} = 2\pi R_2\cdot L\cdot\Sigma_{(t)} = -\pi(R_2^2-R_1^2)\cdot L\cdot\rho_{(t)} = -Q_{interior}$$

• אם למוליך החיצוני יש σ סופי נקבל גם שדה מחוץ לגליל.

חיבור נגדים בטור ובמקביל

אם מחברים נגדים בטור, אז כפי שראינו הזרם שעובר דרך כל נגד הוא שווה. (בעצם פתרנו כבר מספר שאלות כאלו מבלי לשים לב):



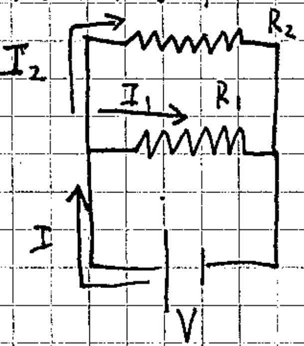
מחוק אוהם:

$$V=V_1+V_2=I_1R_1+I_2R_2=I(R_1+R_2)$$

$$\boxed{R_{tot}=R_1+R_2}\ ,\ \boxed{\frac{V_1}{V_2}=\frac{R_1}{R_2}}$$

(ככל שההתנגדות גבוהה יותר, מפל המתחים על הנגד גדול יותר)

כאשר מחברים נגדים במקביל, אז מפל המתח על כל נגד הוא זהה.



משימור מטען בצומת:

$$I_{tot}=I_1+I_2=\frac{V_1}{R_1}+\frac{V_2}{R_2}=V\left(\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}\right)$$

$$\boxed{\frac{1}{R_{tot}}=\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}}\ ,\ \boxed{\frac{I_1}{I_2}=\frac{R_2}{R_1}}$$

דרך הנגד עם ההתנגדות הגבוהה יעבור פחות זרם.

- כאשר יש מעגלים מסובכים שהחיבור הוא לא בדיוק בטור או במקביל, משתמשים <u>בחוקי קירכהוף</u> ונדבר על כך בשבוע הבא.

- שימו לב שהנוסחאות לחיבור נגדים בטור/מקביל <u>הפוכות</u> מהנוסחאות האנלוגיות עבור קבלים.

זה בגלל שמתקיים: $R=\frac{V}{I}$, $C=\frac{Q}{V}$

הפרש פוטנציאלים $\Delta\phi$

הספק על נגד

$$W = q V$$

השדה במוליך מבצע עבודה על המטענים
ההספק הוא לפיכך:

$$P = \frac{dW}{dt} = V \cdot \frac{dq}{dt} = I \cdot V$$

ולפי חוק אוהם:

$$P = I^2 R = \frac{V^2}{R}$$

זהו ההספק שמתבזבז, בעיקר לחום/ אור, על נגד.

לדוגמא:

תנור חימום שנועד לעבוד בארץ, כלומר עם מתח $V = 220_V$, הוא בעל הספק של 2000_W.

• מהי ההתנגדות של התנור?

$$R = \frac{V^2}{P} = \frac{(220_V)^2}{2000_W} = 24.2\,\Omega$$

• כמה זרם צורך התנור?

$$I = \frac{P}{V} = \frac{2000\,W}{220\,V} = 90.9_A$$