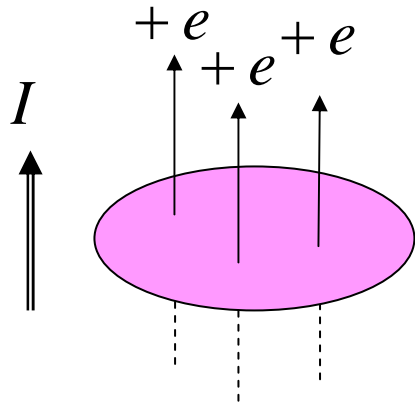
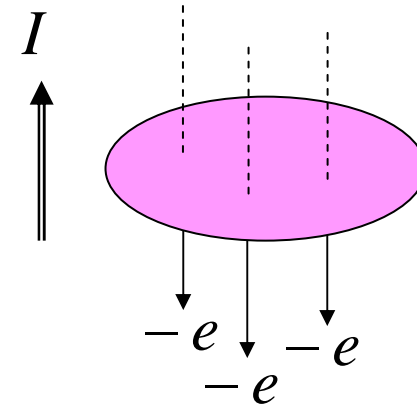


## דוגמאות לזרם

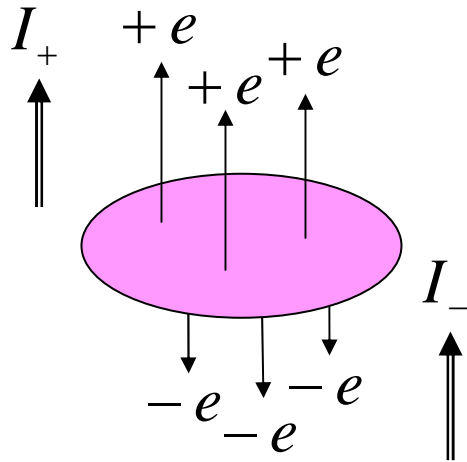


עוברים 10 פרוטונים בשניה  
(כל אחד עם מטען  $+e$ ).  
 $I = 10 \times (1.6 \times 10^{-19} \text{ C}) / \text{s}$   
 $I = 1.6 \times 10^{-18} \text{ A}$

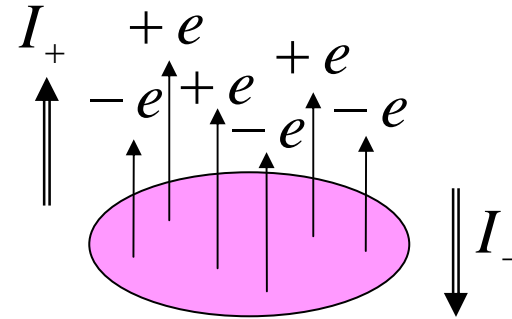


עוברים 10 אלקטרונים בשניה  
(כל אחד עם מטען  $-e$ ).  
 $I = 1.6 \times 10^{-18} \text{ A}$

בשני המקרים, הזרם הוא כלפי מעלה כפי שמצויר (מטענים שליליים תורמים לזרם בכיוון הפוך לתנועתם).



$$I = I_+ + I_- = 2I_+$$



$$I = I_+ - I_- = 0$$

**מה שקובע: מטען נטו!**

למשל, במקרה בצד שמאל, גם האלקטרונים וגם הפרוטונים תורמים לזרם כלפי מעלה, אז הזרם נטו הוא הסכום.

## זרם רגעי

• באופן כללי הזרם תלוי בזמן.

$$I = \frac{dq}{dt} \quad \text{הזרם ברגע נתון:}$$

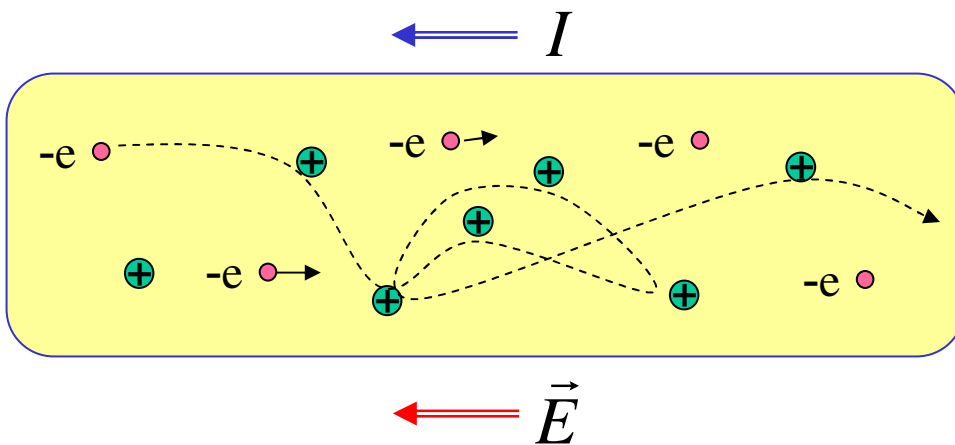
(כאשר מטען  $dq$  עובר בזמן קצר  $dt$ )

$$q = \int_{t_1}^{t_2} I dt \quad \text{סה"כ המטען שעובר בין } t_1 \text{ ו- } t_2 \text{:}$$

(ז"א הסכום של כל ה-  $dq$ )

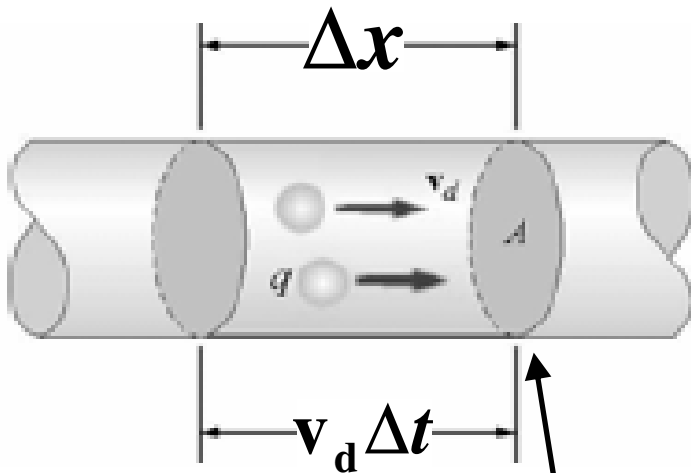
## תנועת מטענים במוליך: המציאות

- הזרם נישא ע"י האלקטרונים וכיוונו ככיוון השדה החשמלי, הפוך מכיוון זרימת האלקטרונים.
- השדה החשמלי מאיץ את האלקטרונים החופשיים. אילו מתנגשים תוך כדי תנועתם ביונים וזה יוצר מעין חיכוך המאט אותם. המהירות הממוצעת בה מתקדמים האלקטרונים לאורך המוליך נקראת מהירות הסחיפה (drift). היא קטנה ככול שקצב ההתנגשויות גדל, ולכן בהרבה חומרים המהירות קטנה כשהטמפרטורה עולה (תלות הזרם בטמפרטורה משמשת, לדוגמא, לויסות אוטומטי של הטמפרטורה באינקובטור).



## הקשר בין הזרם לריכוז נושאי המטען

בזמן  $\Delta t$  האלקטרונים עוברים בממוצע מרחק  $x = v_d \Delta t$ .  
כל האלקטרונים בנפח  $V = A \Delta x = A v_d \Delta t$  יעברו את  $A$  בזמן  $\Delta t$ . אם ריכוז האלקטרונים (ז"א, מספרם ליחידת נפח) הוא  $n$ , אז סה"כ יעברו  $N = nV = nA v_d \Delta t$  אלקטרונים.



מחשבים את המטען שעובר דרך שטח חתך זה בזמן  $\Delta t$ .



גודל המטען שעובר:

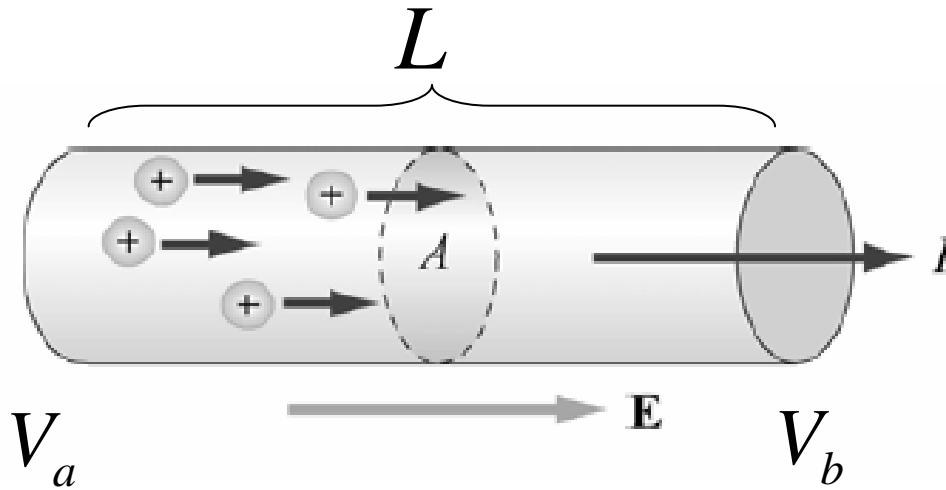
$$|\Delta q| = eN = enA v_d \Delta t$$

ולכן גודל הזרם:

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t} = enA v_d$$

## התנגדות חשמלית

- מהירות הסחיפה תלויה בגודלו של השדה החשמלי  $E$  בתוך המוליך ובקצב ההתנגשויות.
- מפעילים שדה  $E$  על חוט נתון. בחומרים רבים מתקיים הקשר:



$$v_d \propto E$$



$$I \propto AE$$

$E$  אחיד במוליך בעל שטח חתך  $A$  קבוע, ולכן הפרש הפוטנציאלים בין שתי נקודות במוליך הנמצאות במרחק  $L$  זו מזו:

$$|\Delta V| = |V_b - V_a| = EL$$

כך קיבלנו ש-  $I$  ו-  $\Delta V$  (לפעמים כותבים פשוט  $V$ ) הם ביחס ישר.

$$V = IR$$

חוק אוהם:

$$R = \rho \frac{L}{A}$$

לכן כותבים:

$$\frac{V}{I} \propto \frac{L}{A}$$

מהמשוואות בשקף  
הקודם רואים ש:

$\rho$  - התנגדות סגולית (resistivity),  
תלויה רק בטמפרטורה ובתכונות  
המיקרוסקופיות של החומר (אך לא  
בצורת החוט: L ו-A).

R - התנגדות  
(Resistance)

אופציונאלי:  
17.9 בספר

יחידות R:  $1 \text{ ohm } (\Omega) = 1 \text{ volt}/1 \text{ ampere}$   
יחידות  $\rho$ :  $\text{ohm} \cdot \text{meter}$

חומרים בהם  $\rho$  הוא אכן קבוע (ולא תלוי בזרם I)  
נקראים חומרים אוהמים.

## דוגמא

$$\rho = 1.7 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$$

לנחושת (דוגמא  
למוליך) יש:

$$\rho \sim 10^{12} \Omega \cdot m$$

לשם השוואה, לזכוכית  
(דוגמא לחומר מבודד):

נחשב את R של חוט נחושת באורך 30 ס"מ ושטח חתך של

עיגול ברדיוס 1 מ"מ:

$$R = \rho \frac{L}{A} =$$

$$1.7 \times 10^{-8} \Omega \cdot m \frac{0.3 m}{\pi(10^{-3} m)^2} = 1.6 \times 10^{-3} \Omega$$

עכשיו נחבר את החוט לבטרייה 9V דרך נגד  $3\Omega$ , אז הזרם הוא:

$$I = \frac{V}{R} = \frac{9V}{3\Omega} = 3A$$

הערה: הזנחנו את R הנמוך של החוט לעומת R של הנגד.



## דוגמא: המשך

לנחושת יש מסה אטומית של 64, אלקטרון

חופשי אחד לכל אטום, וצפיפות מסה  $d$ :  $d = 8.9 \text{ g/cm}^3$

המשוואה משקף 5:  $I = en_e A v_d$

הסימנים  $M$ ,  $m_p$ ,  $n_e$ , ו- $n_{\text{Cu}}$  הם: המסה של אטום נחושת, המסה של פרוטון, מספר האלקטרונים ליחידת נפח, ומספר אטומי הנחושת ליחידת נפח. עכשיו נחשב את מהירות הסחיפה (שיוצאת איטית באופן מפתיע):

$$d = n_{\text{Cu}} M \quad n_e = n_{\text{Cu}} \quad M = 64 m_p$$

$$v_d = \frac{I}{en_e A} = \frac{IM}{edA} = \frac{3 \text{ C/s} \cdot 64 \cdot 1.7 \times 10^{-27} \text{ kg}}{1.6 \times 10^{-19} \text{ C} \cdot 8.9 \times 10^3 \text{ kg/m}^3 \cdot \pi (10^{-3} \text{ m})^2}$$

$$= 7.3 \times 10^{-5} \text{ m/s} = 26 \text{ cm/hr}$$