

## פרק 15 חוקי הזרם הישר

לעתים משתמשים במטעני חשמל נייחים. כדי להפיק תועלת מהמטענים החשמליים יש להניע אותם, כלומר ליצור זרם חשמל. זרם החשמל מאיר בתים, מניע מכונות, יוצר גלי רדיו ומפעיל את המחשבים. נתחיל מהמקרה הפשוט ביותר של תנועת החלקיקים הטעונים: זרם חשמל ישר.

### §104 זרם חשמל עוצמת הזרם

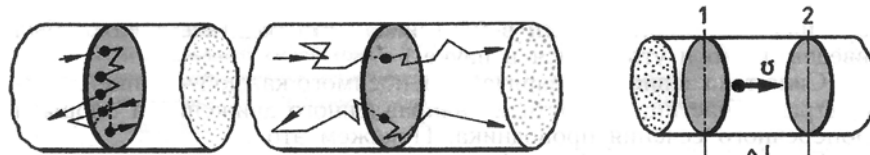
נגדיר במדויק את מושג **זרם החשמל**.  
נדון בגודל, המגדיר את הזרם באופן כמותי.  
נמצא כמה מהר נעים האלקטרונים בחוטי החשמל בביתנו.

במהלך תנועתם של חלקיקים טעונים במוליך מתרחשת העברת מטען חשמלי ממקום אחד לאחר; אולם אם תנועת החלקיקים היא תנועה תרמית בלתי מסודרת כתנועת האלקטרונים החופשיים במתכת, אין העברת מטען מתרחשת (ציור 209א). המטען החשמלי עובר דרך חתך המוליך במקרה אחד בלבד: כאשר בו-זמנית עם תנועה בלתי מסודרת משתתפים האלקטרונים בתנועה מסודרת (ציור 209ב). במקרה זה נאמר שבמוליך עובר **זרם חשמל**.

#### זרם חשמל הוא תנועה מסודרת (מכוונת) של חלקיקים טעונים.

זרם חשמל נוצר עקב תנועה מסודרת של אלקטרונים חופשיים או יונים.

אם נניע גוף נייטרלי בשלמותו, לא ייווצר זרם חשמל – למרות קיומה של תנועה מסודרת של מספר עצום של אלקטרונים ושל גרעיני האטום (המכילים פרוטונים). המטען הכולל, העובר דרך כל חתך שהוא של המוליך, יהיה שווה לאפס, מכיוון שמטענים בעלי סימנים נגדיים נעים במהירות ממוצעת שווה.



ציור 209א

ציור 209ב

ציור 210

חוקי הזרם הישר – חוגילים ותקציר

לזרם החשמל כיוון מסוים. **כיוון הזרם נקבע ככיוון תנועתם של חלקיקים חיוביים**. אם מקורו של הזרם הוא תנועתם של חלקיקים שליליים, מגמת הזרם נגדית למגמת תנועת החלקיקים (הגדרה זו של מגמת הזרם אינה מוצלחת במיוחד, מכיוון שברוב המקרים נוצר הזרם מתנועת אלקטרונים הטעונים שלילית. בחירת מגמת הזרם נקבעה כשלא היה ידוע עדיין על קיומם של אלקטרונים חופשיים במתכות).

### פעולות הזרם

איננו רואים במישרין את תנועת החלקיקים במוליכים, ואת קיומו של זרם החשמל אנו קובעים לפי פעולות הנגרמות בגללו או לפי תופעות המתלוות אליו: ראשית, המוליך, שדרכו עובר הזרם, מתחמם; שנית, זרם החשמל עשוי לשנות את ההרכב הכימי של המוליך – לדוגמה: לפרק את התמיסות ולבודד את המרכיבים (כמו את הנחושת מתמיסה של נחושת כלורית); שלישית, הזרם משפיע על זרמים אחרים ועל מגנטים בהפעלת כוח עליהם. השפעה זו מכונה **השפעה מגנטית**: המחט המגנטית מוּטית בקרבת המוליך שבו עובר זרם. להבדיל מהפעולה הכימית והתרמית, הפעולה המגנטית היא התכונה הבסיסית של הזרם, מכיוון שזו מתגלה בכל המוליכים ללא יוצא מהכלל. הפעולה הכימית של הזרם מתגלה בתמיסות ובתרכובות נוזליות ומוליכות בלבד, וחימום, למשל, איננו קיים במוליכי-על.

### עוצמת הזרם

כאשר מתייצב זרם החשמל במעגל, עובר דרך חתך המוליך שיעור קבוע של מטען חשמלי ביחידת הזמן. **כמות המטען, המועברת ביחידת זמן, היא המידה הבסיסית של הזרם, והיא מכונה עוצמת הזרם**. אם דרך חתך המוליך עובר במשך הזמן  $\Delta t$  מטען  $\Delta q$ , שווה עוצמת הזרם:

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t} \quad (15.1)$$

**עוצמת הזרם שווה ליחס שבין המטען  $\Delta q$ , המועבר דרך חתך המוליך בפרק זמן  $\Delta t$ , לבין פרק זמן זה. אם אין עוצמת הזרם משתנה בזמן, מכונה הזרם זרם קבוע.**

בדומה למטען, עוצמת הזרם הוא גודל סקלרי, והוא עשוי להיות חיובי וגם

שלילי. סימן הזרם תלוי בקביעת המגמה החיובית לאורך המוליך שבו הוא זורם. עוצמת הזרם חיובית ( $I > 0$ ) אם הזרם מכוון לאורך המגמה החיובית של המוליך, והיא שלילית במקרה ההפוך (המושג **עוצמת הזרם** איננו מוצלח, מכיוון שלמושג **עוצמה**, כפי שמשמשים בו לגבי זרם, אין שום קשר למושג **העוצמה** במכניקה; אולם המושג **עוצמת הזרם** השתרש בתורת החשמל זה זמן רב).

עוצמת הזרם תלויה במטען שנושא כל חלקיק; בריכוז החלקיקים; במהירות הממוצעת של תנועתם המכוונת; ובשטח החתך של המוליך. נוכיח זאת.

למוליך חתך בעל שטח  $S$  (ציור 210). הכיוון החיובי נקבע משמאל לימין.

המטען של כל חלקיק הוא  $q_0$ . בנפח המוליך, המוגבל על-ידי החתכים 1 ו-2, כלואים  $nS\Delta l$  חלקיקים, כאשר:  $n$  – ריכוז החלקיקים. המטען הכולל הוא  $q = q_0 nS\Delta l$ .

אם החלקיקים נעים משמאל לימין במהירות ממוצעת  $v$ , כל החלקיקים הכלואים בנפח הנתון יעברו בזמן  $\Delta t = \frac{\Delta l}{v}$  דרך החתך 2. לכן עוצמת הזרם שווה:

$$(15.2) \quad I = \frac{\Delta q}{\Delta t} = \frac{q_0 nS\Delta l v}{\Delta l} = q_0 n v S$$

במערכת היחידות הבינלאומית SI מבטאים את עוצמת הזרם ביחידות **אמפר (A)**.

יחידה זו נקבעת על-פי הכוח המגנטי הפועל בין הזרמים (נושא זה עוד יידון בהמשך לימודים).

מודדים את עוצמת הזרם באמצעות **האמפרמטר**. פעולת המכשיר הזה מבוססת על התופעות המגנטיות של הזרם.

### מהירות התנועה המסודרת של אלקטרונים במוליך

נמצא את מהירות התנועה המסודרת של האלקטרונים במוליך מתכתי. בהתאם

לנוסחה (15.2):

$$v = \frac{I}{enS}$$

כאשר:  $e$  – גודל מטען האלקטרון. נניח שעוצמת הזרם  $I = 1 \text{ A}$ , ושטח חתך

המוליך  $S = 10^{-6} \text{ m}^2$ . גודל מטען האלקטרון:  $e = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ . מספר

חוקי הזרם הישר – חגילים ותקציר

האלקטרונים ב-  $1 \text{ m}^3$  של נחושת שווה למספר האטומים בנפח זה, מכיוון שאחד מאלקטרונים הערכיות (הוולנטיים) שבכל אטום נעשה חופשי ומשותף. המספר הזה הוא:  $n = 8.5 \cdot 10^{28} \text{ m}^{-3}$  (ראו שאלה 7 במקבץ תרגילים 11). לכן:

$$v = \frac{1}{1.6 \cdot 10^{-19} \cdot 8.5 \cdot 10^{28} \cdot 10^{-6}} \frac{\text{m}}{\text{sec}} = 7 \cdot 10^{-5} \frac{\text{m}}{\text{sec}}$$

כפי שאתם רואים, מהירות התנועה המסודרת של האלקטרונים נמוכה מאוד.

המידה הכמותית הבסיסית של זרם חשמל היא עוצמת הזרם. היא מוגדרת על-ידי כמות המטען החשמלי, העוברת דרך חתך המוליך ביחידת הזמן. מהירות התנועה המסודרת של חלקיקים טעונים (אלקטרונים) במוליך אטית מאוד: כ-  $0.1 \text{ mm/sec}$ .

?

1. מהו זרם החשמל?
2. מהי עוצמת הזרם?
3. איזו מגמה של זרם חשמל נחשבת חיובית?
4. פי כמה קטנה המהירות הממוצעת של האלקטרונים במוליך ממהירות הולך רגל?

### §105 התנאים הנדרשים להופעת זרם החשמל

מה דרוש ליצירת זרם החשמל? חשבו על כך בעצמכם, ורק לאחר מכן קראו סעיף זה.

**הופעת זרם חשמל קבוע בחומר דורשת את קיומם של חלקיקים טעונים וחופשיים.** אם המטענים החיוביים והשליליים באטומים או במולקולות קשורים אלה לאלה, לא תגרום תנועתם להופעת זרם החשמל.

אם כך, קיומם של מטענים חופשיים אינו תנאי מספיק להופעת הזרם. כדי ליצור את התנועה המסודרת של חלקיקים טעונים ולתמוך בה, דרוש כוח שיפעל עליהם במגמה מסוימת. אם כוח זה יפסיק לפעול, תופסק גם התנועה המסודרת עקב פעולת כוח ההתנגדות, הנגרם על-ידי יונים של הסריג הגבישי או על-ידי מולקולות נייטרליות של אלקטרוליטים.

חוקי הזרם הישר – חרגילים ותקציר

כפי שזכור לנו, פועל השדה החשמלי על חלקיק טעון בכוח:  $\vec{F} = q\vec{E}$ .

בדרך כלל השדה החשמלי, הקיים בתוך המוליך, הוא היוצר את התנועה המסודרת של החלקיקים הטעונים ותומך בה. רק במקרה הסטטי בלבד, כאשר המטענים נייחים, שווה השדה החשמלי בתוך המוליך לאפס.

אם בתוך המוליך קיים שדה חשמלי, אזי בהתאם לנוסחה (14.21) קיים בין קצות המוליך הפרש פוטנציאלים; וכאשר הפרש הפוטנציאלים איננו משתנה בזמן, נוצר בתוך המוליך זרם חשמל קבוע. הפוטנציאל הולך וקטן לאורך המוליך מהערך המרבי בקצהו האחד של המוליך ועד לערכו המזערי בקצהו האחר.

את זרם החשמל ניתן ליצור בחומר, שבו קיימים חלקיקים חופשיים טעונים בלבד. על מנת שהחלקיקים האלה יתחילו לנוע, יש ליצור בתוך המוליך את השדה החשמלי.

### §106 חוק אום למקטע של מעגל ההתנגדות החשמלית

את חוק אום למדתם כבר. החוק פשוט, אולם הוא כה חשוב, שכדאי לחזור עליו.

#### גרף וולט-אמפר

בסעיף הקודם נקבע, שהתנאי לקיום הזרם במוליך הוא יצירת הפרש פוטנציאלים בין קצות המוליך, ועוצמת הזרם במוליך נקבעת לפי הפרש פוטנציאלים זה. ככל שהפרש הפוטנציאלים גדול יותר, כן גדולה יותר עוצמת השדה החשמלי במוליך; בהתאם גבוהה יותר מהירות התנועה המכוונת של החלקיקים הטעונים; ובהתאם לנוסחה (15.2) גדלה אף עוצמת הזרם.

לכל סוג של מוליך – אם מוצק הוא, נוזל או גז – קיימת תלות סגולית שונה של עוצמת הזרם בהפרש הפוטנציאלים בין קצותיו. תלות זו מכונה **גרף וולט-אמפר** של המוליך. קובעים אותו במדידת עוצמת הזרם במוליך עבור ערכים שונים של מתח. לגרף וולט-אמפר חשיבות רבה בחקירת זרם החשמל.

#### חוק אום

צורתו הפשוטה ביותר של **גרף וולט-אמפר** היא של מוליכים מתכתיים ושל

חוקי הזרם הישר – חגילים ותקציר

תמיסות אלקטרוליטים. לראשונה גילה קשר זה (עבור המתכות) המדען הגרמני **גיאורג אום**. לכן נושאת תלות עוצמת הזרם במתח את שמו: **חוק אום**.

**גיאורג סימון אום (1787 - 1854)**



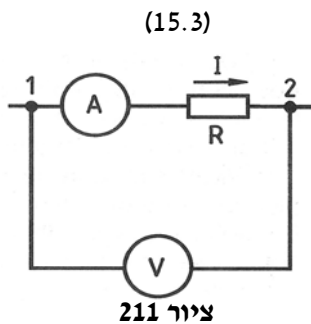
מדען גרמני. עבד כמורה בבית-ספר. **אוים** גילה את החוק של תלות עוצמת הזרם במתח עבור מקטע של מעגל, וגם את חוק הזרם במעגל סגור. את המכשיר הרגיש למדידת זרם בנה הוא בעצמו. כמקור מתח השתמש אום ב"זוג-תרמי" העשוי משני חוטי מתכת שונים המולחמים בקצותיהם. בהתאם להפרש הטמפרטורות בין הקצוות נוצר מתח חשמלי, הפרופורציונלי להפרש הטמפרטורות. אום מצא את תלות ההתנגדות החשמלית של מוליך באורכו ובשטח חתכו.

בקטע של מעגל, המתואר בציור 211, מכיוון הזרם מנקודה 1 לנקודה 2. הפרש הפוטנציאלים (המתח) בין קצות המוליך שווה ל:  $U = \varphi_1 - \varphi_2$ . מכיוון שהזרם מכיוון משמאל לימין, מכוונת עוצמת השדה החשמלי באותה מגמה, ו-  $\varphi_1 > \varphi_2$ .

**על-פי חוק אום למקטע של מעגל נמצאת עוצמת הזרם ביחס ישר למתח U**

**וביחס הפוך להתנגדות המוליך R:**

$$I = \frac{U}{R}$$



ביטוי של חוק אום פשוט מאוד, אולם בזמנו היה די קשה להוכיח את קיומו באופן ניסויי. הסיבה היתה נעוצה בעובדה, שקטן הפרש הפוטנציאלים בין קצות קטע של מוליך מתכתי קצר – אפילו עבור עוצמת זרם רבה – עקב הערך הקטן של התנגדות המוליך.

אם כך, אין האלקטרומטר הרגיל מתאים למדידת מתחים כה קטנים: רגישותו נמוכה מדי, ודרוש מכשיר רגיש בהרבה. במדידות של זרם באמצעות האמפרמטר, ושל מתח – בעזרת וולטמטר רגיש, אפשר להיווכח ביחס הישר שבין עוצמת הזרם לבין המתח. המכשירים הרגילים למדידת המתח, הוולטמטרים, מבוססים אף הם על חוק אום. עקרון המבנה של וולטמטר זהה לזה של האמפרמטר. זויות הסטייה

של מחוג המכשיר פרופורציונלית לעוצמת הזרם. עוצמת הזרם הזורם בוולטמטר נמדדת לפי המתח בין קצות המעגל שאליו הוא מחובר. לכן אם יודעים את ההתנגדות של הוולטמטר, אפשר לגלות את המתח על-פי עוצמת הזרם. במציאות מכילים את המכשיר כך שיראה ישירות את המתח בוולטים.

### ההתנגדות

המאפיין החשמלי החשוב ביותר של מוליך הוא **ההתנגדות**. בערך זה תלויה עוצמת הזרם במוליך עבור הפרש מתח נתון בקצותיו. ההתנגדות החשמלית של מוליך מהווה את מידת ההתנגדות של המוליך להתייצבותו של זרם חשמלי באמצעות חוק אום (15.3) ניתן למצוא את התנגדות המוליך:

$$R = \frac{U}{I}$$

כדי לעשות זאת יש למדוד את המתח ואת עוצמת הזרם. **ההתנגדות תלויה בחומר המוליך ובמידותיו הגיאומטריות**. התנגדות מוליך, שאורכו  $l$  ושטח חתכו  $S$ , היא:

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (15.4)$$

$\rho$  הוא ערך, התלוי בסוג החומר ובמצבו (בראש ובראשונה בטמפרטורה שלו). הגודל  $\rho$  מכונה **ההתנגדות הסגולית** של מוליך. **ההתנגדות הסגולית שווה בערכה המספרי להתנגדות מוליך, שצורתו קובייה בעלת מקצוע של 1 מ', כאשר הזרם שעובר בה מכוון במאונך לאחת הפאות**. את יחידת ההתנגדות קובעים על בסיס חוק אום ומכנים אותה **אום**. **מוליך הוא בעל התנגדות של 1 אום ( $1 \Omega$ ), אם בהשפעת הפרש מתחים של 1 V בין קצותיו עובר בו זרם של 1 A**.

היחידה של ההתנגדות הסגולית היא  $1 \Omega \cdot m$ . ההתנגדות הסגולית של מתכות קטנה, ולחומרים דיאלקטריים התנגדות סגולית גדולה מאוד. את ערכי ההתנגדות הסגולית של חומרים שונים אפשר למצוא בטבלאות.

### חשיבותו של חוק אום

חוק אום מגדיר את עוצמת הזרם במעגל חשמלי עבור הפרש מתח נתון והתנגדות ידועה. הוא מאפשר לחשב את פעולות הזרם (תרמית, כימית ומגנטית),

מכיוון שהן תלויות בעוצמת הזרם. מחוק אום נובע שמסוכן לקצר את רשת החשמל הביתית על-ידי מוליך בעל התנגדות קטנה: עוצמת הזרם תהיה כה גדולה, שהיא עלולה לגרום להתלהטות מוליכים ולשריפה בעקבותיה.

חוק אום הוא הבסיס לכל הענף של זרמי חשמל קבועים. את הנוסחה  $I = \frac{U}{R}$  חייבים להבין היטב ולזכרה.

?

1. בהתאם לחוק אום,  $R = \frac{U}{I}$ . האם פירוש הדבר הוא שההתנגדות תלויה בעוצמת הזרם – או במתח? הסבירו.
2. מהי התנגדות סגולית?
3. באילו יחידות נמדדת ההתנגדות הסגולית? נמקו.

### §107 מעגלים חשמליים חיבור מוליכים בטור ובמקביל

ממקור הזרם אפשר להעביר אנרגיה דרך חוטים מוליכים אל המכשירים שצורכים אנרגיה, כגון: נורת חשמל, מקלט רדיו, תנור, מאורר ועוד רבים אחרים ומגוונים. כדי להעביר אנרגיה מרכיבים מעגלים חשמליים בעלי מורכבויות שונות. המעגל החשמלי מורכב ממקור אנרגיה, מהמכשירים שצורכים את אנרגיית החשמל, מחוטי חיבור וממפסקים לסגירת המעגל. לעתים כולל המעגל החשמלי מכשירי מדידה לעוצמת זרם ולהפרש מתח בקטעים השונים של המעגל: אמפרמטרים ווולטמטרים.

החיבורים הפשוטים והנפוצים ביותר הם החיבור בטור והחיבור במקביל.

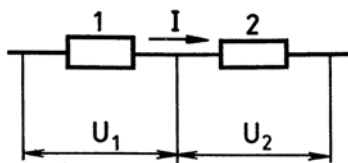
#### חיבור נגדים בטור

במעגל חשמלי, שרכיביו מחוברים בטור, אין פיצולים: כל הנגדים מחוברים במעגל בטור זה לאחר זה. ציור 212 מציג חיבור בטור של שני נגדים, 1 ו-2, בעלי ההתנגדות  $R_1$  ו- $R_2$ , בהתאמה. אלה עשויים להיות, למשל, שתי נורות או שני סלילי מנוע חשמלי.

עוצמת הזרם בשני הנגדים שווה:

$$I_1 = I_2 = I \quad (15.5)$$

חוקי הזרם הישר – חגילים ותקציר



ציור 212

כאשר עוצמת הזרם קבועה, אין המטען החשמלי נאגר בתוך המוליכים (הנגדים וחוטי ההולכה), ודרך כל חתך של מוליך עובר מטען שווה בפרק זמן מסוים.

הפרש המתח בין קצות הקטע שווה לסכום המתחים הנפרדים שעל הנגדים:

$$U = U_1 + U_2$$

(את ההוכחה לביטוי פשוט זה אנו משאירים כתרגיל חשיבה עבורכם).

נשתמש בחוק אום לשני הנגדים  $R_1$  ו- $R_2$ , ונקבל שההתנגדות הכוללת של כל הקטע, המורכב משני הנגדים (ומחוטי ההולכה, שהתנגדותם אפסית) המחוברים בטור, היא:

$$R = R_1 + R_2 \quad (15.6)$$

נסו להוכיח, שהמתחים בין קצות הנגדים והתנגדויותיהם בחיבור הטורי

קשורים ביחס:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2} \quad (15.7)$$

#### חיבור נגדים במקביל

ציור 213 מציג חיבור במקביל של שני נגדים 1 ו-2 בעלי ההתנגדויות  $R_1$  ו- $R_2$ .

במקרה זה מתפצל זרם החשמל  $I$  לשני חלקים. את עוצמות הזרם בנגדים נסמן

ב- $I_1$  וב- $I_2$ , בהתאמה. מכיוון שהמוליכים מתפצלים בנקודה  $a$  (נקודה זו מכונה

**צומת**), ומאחר שהמטען החשמלי אינו נאגר, שווה המטען הנכנס לצומת ביחידת

הזמן למטען היוצא ממנה באותה יחידת זמן.

לכן:

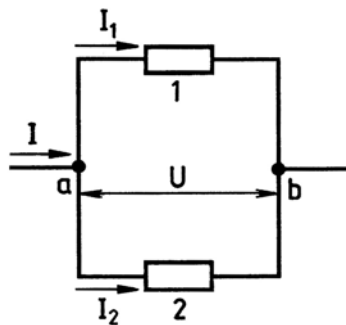
$$I = I_1 + I_2 \quad (15.8)$$

המתח  $U$  שווה בין קצות הנגדים המחוברים במקביל; אלה אותן נקודות מדידה  $a$

ו- $b$  לשני הנגדים. ברשתות החשמל הביתיות שיעור המתח 220 או 127 V.

להפרש מתח זה מתוכננים להתחבר מכשירי חשמל, הצורכים את אנרגיית

החשמל.



ציור 213

החיבור במקביל של צרכנים שונים הוא החיבור הנפוץ ביותר. בחיבור שכזה תקלה באחד המכשירים – למשל, נתק או התכת חוט הלהט בנורה – אינה משפיעה על עבודתם של האחרים. לעומת זאת, בחיבור בטור מנתקת תקלה במכשיר אחד את המעגל כולו.

נשתמש בחוק אום לקטע כולו ולקטעים שהתנגדותיהם  $R_1$  ו-  $R_2$ , ונקבל שהערך ההפוך להתנגדות הכוללת של הקטע ab שווה לסכום הערכים ההפוכים של הנגדים הבודדים:

$$(15.9) \quad \frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

$$(15.10) \quad R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad \text{מכאן נובע:}$$

בחיבור במקביל קשורים עוצמת הזרם בכל נגד וערכי התנגדותו ביחס:

$$(15.11) \quad \frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1}$$

במעגל מתחברים נגדים שונים זה עם זה בטור או במקביל. במקרה הראשון שווה עוצמת הזרם בכל הנגדים, ובמקרה השני שווים המתחים בין קצות הנגדים. ברשתות החשמל מחברים את המכשירים השונים, בדרך כלל, במקביל.

?

1. נורות החשמל בבית מחוברות במקביל; בשרשראות התאורה לקישוט הרחובות הן נראות כמחוברות בטור. כיצד ייתכן?
2. ההתנגדות של כל נגד שווה לאום אחד. מהי ההתנגדות של שני נגדים, המחוברים בטור? במקביל?

## §108 עבודה והספק של זרם ישר

בזרם החשמל נעשה שימוש נרחב בשל היותו נושא אנרגיה. אנרגיה זו – ניתן להמירה לסוגי אנרגיה שונים.

תנועה מכוונת של חלקיקים טעונים במוליך היא תולדה של **עבודת השדה החשמלי**; עבודה זו מכונה: **עבודת הזרם**.

### עבודת הזרם

נתבונן בקטע כלשהו של מעגל שבו נגד – לדוגמה: חוט להט של נורה, סליל של מנוע חשמלי. בזמן  $\Delta t$  עובר דרך חתך המוליך מטען  $\Delta q$ .

השדה החשמלי ביצע עבודה:  $A = \Delta q \cdot U$ .

מכיוון שעוצמת הזרם היא  $I = \frac{\Delta q}{\Delta t}$ , שווה העבודה:

$$A = I \cdot U \cdot \Delta t \quad (15.12)$$

**עבודת הזרם על מקטע מעגל שווה למכפלת עוצמת הזרם בהפרש המתח שבין קצות המקטע ובפרק הזמן, שבמהלכו התבצעה העבודה.**

בהתאם לחוק שימור האנרגיה תהא עבודה זו שווה לשינוי המצב האנרגטי במקטע הנתון. לכן האנרגיה שנפלטה במקטע זה בזמן  $\Delta t$  שווה לעבודת הזרם [ראו נוסחה (15.12)].

כאשר לא מתבצעת במקטע הנדון עבודה מכנית, וזרם החשמל אינו מבצע פעולות כימיות, מתרחש חימום הנגד שבמקטע, והנגד המחומם מוסר את חומו לגופים הסובבים אותו.

חימום המוליך מתבצע באופן הבא: השדה החשמלי מאיץ את האלקטרונים, ובמהלך ההתנגשויות בין האלקטרונים לבין היונים של הסריג הגבישי מעבירים האלקטרונים ליונים חלק מהאנרגיה. כתוצאה מכך גדלה האנרגיה הקינטית של התנועה הבלתי מסודרת (הכאוטית) של היונים סביב מצבי שיווי-המשקל, כלומר גדלה האנרגיה הפנימית. אז עולה טמפרטורת המוליך, והוא מתחיל למסור מחומו לגופים סביבו. זמן לא רב לאחר סגירת המעגל מתייצב התהליך, משום שקצב

בריאת החום משתווה לקצב פיזורו לסביבה, והטמפרטורה מפסיקה להשתנות בזמן. אומנם ממשיכה ונבראת בנגד אנרגיה חומנית על חשבון עבודת השדה, אך האנרגיה הפנימית של המוליך נשארת קבועה, ועמה הטמפרטורה, מכיוון שהוא מוסר לגופים סביבו חום בקצב השווה לקצב (להספק) עבודת הזרם. הנוסחה (15.12) לעבודת הזרם קובעת את כמות החום שמוסר הנגד לגופים סביבו.

אם נבטא בנוסחה (15.12) את המתח באמצעות הזרם – או את הזרם באמצעות המתח (בעזרת חוק אום) – נקבל שלוש נוסחאות שוות-ערך:

$$(15.13) \quad A = I \cdot U \cdot \Delta t = I^2 \cdot R \cdot \Delta t = \frac{U^2}{R} \cdot \Delta t = Q$$

הנוסחה  $A = I^2 \cdot R \cdot \Delta t$  נוחה לשימוש עבור חיבור נגדים בטור, מכיוון שבמקרה זה שווה עוצמת הזרם בכל הנגדים. עבור חיבור במקביל נוח יותר להשתמש בנוסחה  $A = \frac{U^2}{R} \Delta t$ , מכיוון שהפרש המתח שווה בין קצות כל הנגדים.

#### חוק ג'אול

החוק, המגדיר את כמות החום הנפלט לסביבה על-ידי נגד נושא זרם, התגלה לראשונה באופן ניסויי על-ידי המדען האנגלי ג' ג'אול (1818 – 1889) והמדען הרוסי א' לֶנֶץ (1804 – 1865). חוק ג'אול נוסח כדלקמן: **כמות החום, הנפלטת על-ידי נגד נושא זרם, שווה למכפלת ריבוע עוצמת הזרם בהתנגדות המוליך ובזמן העברת הזרם במוליך:**

$$(15.14) \quad Q = I^2 \cdot R \cdot \Delta t$$

פיתחנו חוק הזה בעזרת חוק שימור האנרגיה. הנוסחה (15.14) מאפשרת לחשב את כמות החום, הנפלט בכל מקטע של מעגל הכולל נגדים כלשהם.

#### הספק הזרם

כל מכשיר חשמלי (כגון נורה, מנוע חשמלי) מתוכנן לצריכת אנרגיה מסוימת ביחידת זמן. לכן בנוסף לערך **עבודת הזרם** חשוב מאוד מושג **הספק הזרם**. **הספק הזרם שווה ליחס בין עבודת הזרם בזמן  $\Delta t$  לבין פרק זמן זה.**

בהתאם להגדרה זו:

$$(15.15) \quad P = \frac{A}{\Delta t} = I \cdot U$$

חוקי הזרם הישר – חרגילים ותקציר

בסיוע חוק אוס למקטע מעגל ניתן לרשום ביטוי זה להספק בכמה צורות שוות-

ערך:

$$P = IU = I^2R = \frac{U^2}{R}$$

ברוב המכשירים מצוין ההספק שהם צורכים.

זרימת זרם החשמל דרך מוליך מתלווה בפליטת אנרגיה. מקורה של אנרגיה זו בעבודת הזרם, וזו שווה למכפלת המטען המועבר בהפרש המתח שבין קצות הנגד.

?

1. מהי עבודת הזרם?

2. מהו הספק הזרם?

3. באילו יחידות נמדד הספק הזרם?

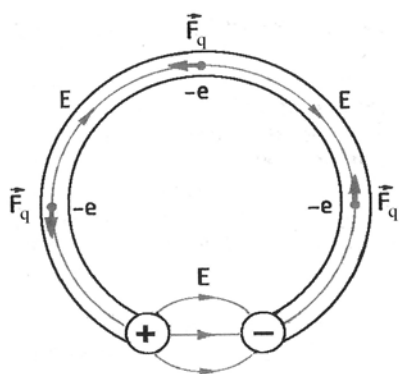
### §109 כוח אלקטרומניע

כל מקור זרם מאופיין בערך **כוח אלקטרומניע** (או כא"מ). על סוללת האצבע של הפנס רשום: 1.5 V. מהי המשמעות של רישום זה?

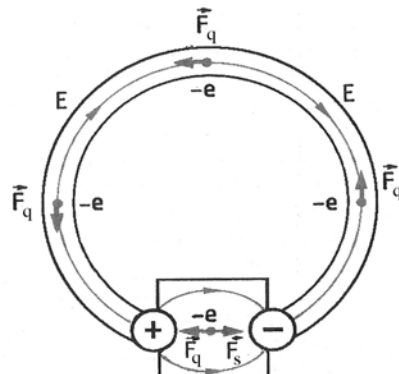
שני כדורי מתכת, הטעונים במטענים נגדיים, חוברו באמצעות חוט מוליך. בהשפעת השדה החשמלי של מטענים אלה זורם לאורך המוליך זרם חשמל (ציור 214). אולם הזרם הזה יימשך זמן קצר מאוד: המטענים ינוטרלו מהר, הפוטנציאלים של הכדורים ישתוו, והשדה החשמלי ייעלם.

#### כוחות זרים

כדי שהזרם יהיה קבוע, צריך לשמור על הפרש פוטנציאלים קבוע בין הכדורים. לשם כך נחוץ מנגנון (**מקור זרם**), אשר יעביר מטענים מכדור אחד למשנהו במגמה נגדית למגמת הכוחות, הפועלים על המטענים האלה מצדו של השדה החשמלי, שיצרו המטענים שנטענו על הכדורים. אם כך, מלבד כוחות חשמליים של מטענים, צריכים לפעול במנגנון זה כוחות שמקורם איננו חשמלי (ציור 215). **אין ביכולתו של השדה החשמלי של חלקיקים טעונים (השדה האלקטרוסטטי) לבדו לשמור על זרם קבוע במעגל.**



ציור 214



ציור 215

כל הכוחות הפועלים על חלקיקים טעונים – מלבד הכוחות שמקורם בשדה האלקטרוסטטי – מכונים כוחות זרים.

הצורך בקיומם של כוחות זרים לשמירת הזרם הקבוע במעגל יתברר עוד יותר, אם ניעזר בחוק שימור האנרגיה: השדה החשמלי הוא שדה פוטנציאלי, ועבודת שדה זה בהעברת חלקיקים טעונים במסלול סגור שווה לאפס. עם זאת, זרימת זרם במוליך מתלווה בפליטת אנרגיה: המוליך מתחמם. לכן בכל מעגל חייב להיות מקור אנרגיה כלשהו, שיספק אותה למעגל. מלבד כוחות קולון חייבים לפעול במקור זה כוחות זרים שאינם פוטנציאליים, ועבודת כוחות אלה לאורך מעגל סגור צריכה להיות שונה מאפס. הודות לעבודת כוחות אלה מקבלים החלקיקים הטעונים אנרגיה מתוך מקור הזרם, ומספקים אותה לנגדים שבמעגל.

הכוחות הזרים מניעים את החלקיקים הטעונים בתוך כל מקורות הזרם: במחוללי חשמל ענקיים בתחנות כוח, בתאים גלווניים, במצברים ועוד.

לאחר סגירת המעגל נוצר שדה חשמלי בכל נגדי המעגל. בתוך מקור הזרם נעים המטענים בהשפעת הכוחות הזרים כנגד כוחות קולון (האלקטרוונים נעים מאלקטרודה חיובית לאלקטרודה השלילית), ובכל יתר חלקי המעגל מניע אותם השדה החשמלי (ראו ציור 215).

#### מקור הכוחות הזרים

מקור הכוחות הזרים עשוי להיות מגוון: במחוללי חשמל של תחנות כוח הכוחות

**הזרים** הם הכוחות, הפועלים מצדו של שדה מגנטי על האלקטרונים במוליך נע.

בתא גלווני, כתא וולטה, פועלים כוחות כימיים: תא וולטה בנוי מאלקטרודות מאבץ ומנחושת, הטבולות בחומצה גופריתית. הכוחות הכימיים גורמים להמסת האבץ בחומצה; היונים החיוביים של האבץ עוברים לתוך התמיסה, ואלקטרודת האבץ עצמה נטענת שלילית (הנחושת כמעט ואינה נמסה בחומצה גופריתית). בין אלקטרודות האבץ והנחושת נוצר הפרש פוטנציאלים, והוא הגורם להיווצרות הזרם במעגל חשמלי סגור.

### כוח אלקטרומניע

פעולת הכוחות הזרים מתאפיינת על-ידי גודל פיזיקלי חשוב, המכונה **כוח אלקטרומניע (כא"מ)**.

**כוח אלקטרומניע במעגל סגור הוא היחס בין עבודת הכוחות הזרים, המתבצעת בהעברת המטען במעגל, לבין גודל המטען:**

$$\varepsilon = \frac{A_s}{q} \quad (15.16)$$

הכוח האלקטרומניע נמדד בוולטים.

ניתן לאתר כוח אלקטרומניע בכל מקטע של מעגל.

הכוח האלקטרומניע הוא העבודה הסגולית של כוחות זרים (העבודה בהעברת מטען יחיד) במקטע נתון. **כוח אלקטרומניע של תא גלווני** הוא עבודת הכוחות הזרים בהעברת מטען חיובי יחיד בתוך התא מקוטב אחד לאחר.

אי-אפשר לבטא את עבודת הכוחות הזרים כהפרש פוטנציאלים, מכיוון שכוחות זרים אינם כוחות משמרים (פוטנציאליים), ועבודתם תלויה בצורת המסלול. כך, לדוגמה, עבודת כוחות זרים בהעברת מטען מחוץ למקור זרם שווה לאפס.

כעת יודעים אתם מהו כא"מ. אם רשום על סוללה 1.5 V, משמעות הרישום היא שכוחות זרים (במקרה זה כימיים) מבצעים עבודה של 1.5 J בהעברת מטען של 1C מהדק אחד של הסוללה לאחר. זרם קבוע לא יכול להתקיים במעגל סגור, אם לא פועלים בו כוחות זרים, כלומר אם אין בו מקור של כא"מ.

?

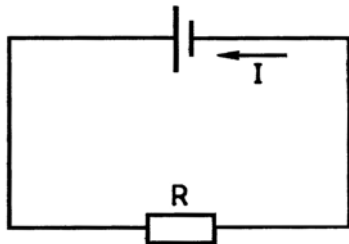
1. מדוע לא יכול שדה חשמלי של חלקיקים טעונים (שדה קולון) לשמור על זרם חשמלי קבוע במעגל?
2. אילו כוחות נחשבים לכוחות זרים?
3. מהו כוח אלקטרומניע?

### §110 חוק אום למעגל סגור

הכוח האלקטרומניע מגדיר את עוצמת הזרם במעגל חשמלי סגור שהתנגדותו ידועה.

בעזרת חוק שימור האנרגיה נמצא את תלות עוצמת הזרם בכא"מ ובהתנגדות.

נתבונן במעגל שלם (סגור), המכיל מקור זרם (תא גלווני, מצבר או מחולל) ונגד בעל התנגדות  $R$  (ראו ציור 216). ערכו של הכא"מ  $\mathcal{E}$ , והתנגדותו  $r$ . **התנגדות המקור מכונה התנגדות פנימית – להבדיל מהתנגדות חיצונית  $R$  של המעגל.** במחולל החשמל  $r$  היא התנגדות הסלילים, ובתא גלווני  $r$  היא התנגדות התמיסה האלקטרוליטית והאלקטרודות.



ציור 216

חוק אום למעגל סגור קובע קשר בין עוצמת הזרם במעגל לבין הכא"מ ולבין ההתנגדות הכוללת של המעגל, השווה ל- $R + r$ . את הקשר ניתן לבנות בעזרת חוק שימור האנרגיה וחוק ג'אול (15.14).

בזמן  $\Delta t$  עובר דרך חתך המוליך מטען  $\Delta q$ . עבודת הכוחות הזרים בהעברת

המטען  $\Delta q$  שווה:  $A_s = \mathcal{E} \cdot \Delta q$ . לכן:

$$A_s = \mathcal{E} \cdot I \cdot \Delta t \quad (15.17)$$

במהלך ביצוע עבודה זו נפלט חום בקטעים הפנימי והחיצוני של המעגל, שערכי

ההתנגדות שלהם  $r$  ו- $R$ , בהתאמה. על-פי חוק ג'אול שווה כמות החום:

$$Q = I^2 \cdot R \cdot \Delta t + I^2 \cdot r \cdot \Delta t \quad (15.18)$$

לפי חוק שימור האנרגיה:  $A = Q$ . משווים את (15.17) ו- (15.18), ומקבלים:

חוקי הזרם הישור – חגילים ותקציר

$$(15.19) \quad \varepsilon = I \cdot R + I \cdot r$$

המכפלה של עוצמת הזרם בהתנגדות של קטע במעגל מכונה **מפל המתח בקטע** זה. הכא"מ שווה לסכום מפלי המתח בקטע הפנימי ובקטע החיצוני של מעגל סגור.

בדרך כלל רושמים את חוק אום למעגל סגור בצורה הבאה:

$$(15.20) \quad I = \frac{\varepsilon}{R + r}$$

**עוצמת הזרם במעגל סגור שווה ליחס בין הכא"מ לבין ההתנגדות הכוללת של המעגל.**

עוצמת הזרם תלויה בשלושה גדלים: בכא"מ  $\varepsilon$  ובהתנגדויות  $R$  ו- $r$  של הקטעים החיצוני והפנימי, בהתאמה. ההתנגדות הפנימית של מקור הזרם אינה משפיעה באופן משמעותי על עוצמת הזרם, אם קטנה היא בהשוואה להתנגדות הקטע החיצוני:  $R \gg r$ . במקרה זה שווה מתח ההדקים של המקור בערך לכא"מ:

$$U = IR \approx \varepsilon$$

כאשר מתרחש קצר במעגל ( $R \rightarrow 0$ ), נקבעת עוצמת הזרם על-ידי ההתנגדות הפנימית של המקור, והיא עלולה להיות גבוהה מאוד – אפילו אם ערך הכא"מ בסדר גודל של כמה וולטים, כאשר הערך של  $r$  קטן (לדוגמה: במצבר  $r \approx 0.1 - 0.001 \Omega$ ).

במקרה כזה עלולים החוטים להינתך, והמכשיר ייצא מכלל פעולה.

אם המעגל כולל כמה מקורות זרם בעלי כא"מ  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$  וכו', המחבורים בטור, שווה הכא"מ הכולל של המעגל לסכום האלגברי של המקורות הבודדים. כדי לדעת את סימנו של הכא"מ של כל מקור, יש להקדים ולבחור במגמה החיובית של זרימת הזרם במעגל. כך נבחרה באופן שרירותי בציור 217 כמגמה חיובית זו שנגד מגמת מחוגי השעון.

נסכים, אם כן, שאם המעבר לאורך המעגל מתבצע מן ההדק השלילי של המקור

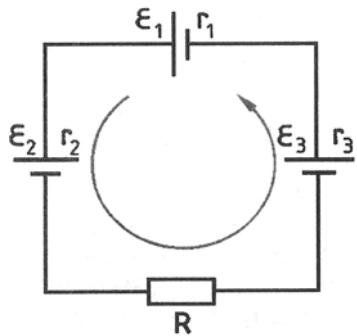
להדק החיובי שלו, הכא"מ  $\varepsilon > 0$ .

תוך כדי המעבר מההדק השלילי של המקור להדק החיובי שלו מבצעים הכוחות

הזרים בתוך המקור עבודה חיובית. אם המעבר לאורך המעגל מתבצע מן ההדק

החיובי של המקור להדק השלילי שלו, יהיה הכא"מ שלילי: הכוחות הזרים בתוך

**חוקי הזרם הישור – חוגילים ותקציר**



ציור 217

המקור מבצעים עבודה שלילית. כך עבור המעגל, המתואר בציור 217, במעבר לאורך המעגל כנגד מגמת מחוגי השעון:

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = |\varepsilon_1| - |\varepsilon_2| + |\varepsilon_3|$$

אם  $\varepsilon > 0$ , אזי בהתאם לנוסחה (15.20) עוצמת הזרם  $I > 0$ , דהיינו מגמת הזרם זהה למגמת המעבר לאורך המעגל; וכאשר  $\varepsilon < 0$ , אזי להפך: מגמת הזרם כנגד מגמת המעבר לאורך המעגל.

ההתנגדות הכוללת  $R_F$  שווה לסכום של כל ערכי ההתנגדויות:

$$R_F = R + r_1 + r_2 + r_3$$

עוצמת הזרם במעגל סגור שווה לכא"מ של המעגל, המחולק בהתנגדות הכוללת.

?

1. במה תלוי סימנו של הכא"מ בחוק אום למעגל סגור?
2. נסחו את חוק אום למעגל סגור.

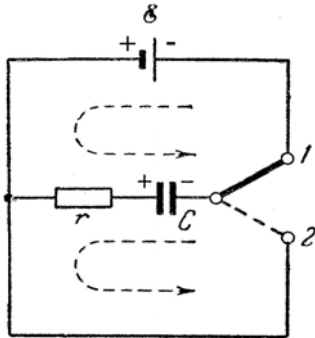
### § 110 פריקת קבל וטעינתו

עד כה עסקנו בזרם קבוע. אולם בחוקים שפיתחנו ניתן להשתמש במקרים רבים של **זרמים משתנים**, כאשר השינוי בעוצמת הזרם מתרחש לא מהר מדי. במעגל זרם מסוים משתנה מעט ערכו של הכא"מ. עוצמת הזרם במעגל תשתנה, ובעבור משך זמן קצר תתייצב על ערך חדש. על-ידי שינויים הדרגתיים קטנים של הכא"מ נוכל לייצר במעגל זרם, שמשתנה באופן הדרגתי. עבור כל מצב ביניים, שקבועה בו עוצמת הזרם, מתקיימים חוקי הזרם הישר. אם נגדיל את מספר מדרגות השינוי בערכי הזרם, ובזמנית נקטין את גודלה של כל מדרגה, נתקרב לתהליך שבו משתנה הזרם באופן רציף. אם כך, את רוב התהליכים, שבהם מופיעים זרמים שעוצמתם משתנה בזמן,

חוקי הזרם הישר – חגילים ותקציר

ניתן לתאר באמצעות חוקי הזרם הישר, אם נשתמש בערכים רגועים של זרמים וכא"מ.

ננתח את תהליך הטעינה והפריקה של קבל. קבל שקיבולו החשמלי C מחובר במעגל הבא: העברת המפסק למצב 1 תביא לטעינת הקבל ממקור הזרם, והעברת המפסק למצב 2 תביא לפריקתו.



ננתח תחילה את מצב הטעינה. נסמן באמצעות  $\varepsilon$  את הכא"מ של המקור,  $r$  – התנגדות המעגל (הכוללת את ההתנגדות הפנימית של המקור), ונבחר כיוון חיובי של זרם כפי שמתואר בציור. נשתמש בחוק השני של קירכהוף לגבי המעגל  $\varepsilon - r - C - \varepsilon$  ונקבל:

$$rI + V = \varepsilon$$

כאשר  $I$  – הערך הרגעי של עוצמת הזרם;  $V$  – הערך הרגעי של מתח הקבל. נשתמש בשוויונים:

$$V = \frac{q}{C}, I = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left( \frac{\Delta q}{\Delta t} \right) = \frac{dq}{dt} = q'(t)$$

כאשר  $q$  – הערך הרגעי של מטען הקבל. משלוש המשוואות אפשר לקבל משוואה אחת לגבי אחד מהנעלמים. נציב את הביטויים עבור  $q$  ו- $I$  באמצעות  $V$ , ונקבל:

$$\frac{dV}{dt} + \frac{1}{rC} V - \frac{\varepsilon}{rC} = 0$$

קיבלנו משוואה דיפרנציאלית לגבי  $V$ . נגדיר משתנה חדש:  $v = V - \varepsilon$ . לגביו נקבל משוואה פשוטה יותר:

$$\frac{dv}{dt} + \frac{1}{rC} v = 0$$

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{1}{rC} v \quad \text{או:}$$

כלומר, אנו מחפשים פונקציה  $v(t)$  כזאת, שהנגזרת שלה שווה לפונקציה עצמה (מוכפלת במקדם קבוע).

כידוע, תכונה כזאת יש לפונקציה מעריכית שבבסיסה הערך  $e$ . פתרון המשוואה

הוא:

$$v = Ae^{-\frac{t}{rC}}$$

כאשר:  $A$  – קבוע התלוי בתנאי ההתחלה. נניח שאנו מתחילים את ספירת הזמן

מרגע סגירת המפסק. אזי תנאי ההתחלה הם:

$$t = 0: V = 0, v = -\varepsilon$$

מציבים ומקבלים:

$$A = -\varepsilon$$

חוזרים למשתנה המקורי  $V$  ומוצאים עבור מתח הקבל את הביטוי:

$$V = \varepsilon \left( 1 - e^{-\frac{t}{rC}} \right)$$

כאשר  $t = 0$ , ערך הביטוי הוא  $V = 0$ , בהתאם לתנאי ההתחלה.

כאשר  $t$  גדל, המתח  $V$  גדל גם הוא, ומתקרב באופן אסימפטוטי לכא"מ של

המקור.

התלות של זרם הטעינה בזמן היא:

$$I = \frac{-V + \varepsilon}{r} = \frac{\varepsilon}{r} e^{-\frac{t}{rC}}$$

לעוצמת הזרם ערך מרבי ברגע ההתחלתי, והיא שואפת לאפס באופן

אסימפטוטי במהלך הטעינה.

במקרה של פריקת הקבל תהיינה המשוואות:

$$rI = V, V = \frac{q}{C}, I = -\frac{dq}{dt}$$

בניגוד למקרה הקודם, מופיע בביטוי של הזרם  $I$  סימן מינוס, מכיוון שהכיוון,

הנבחר כחיובי, מתאים להפחתת מטען הקבל. נבטל בשוויונים הרשומים את  $q$  ו- $I$

ונקבל:

$$\frac{dV}{dt} + \frac{1}{rC} V = 0$$

חוקי הזרם הישר – חגילים ותקציר

הפתרון הוא :

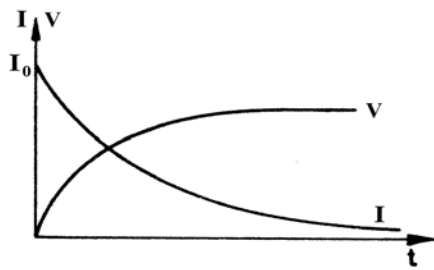
$$V = B e^{-\frac{t}{rC}}$$

אם התחלת ספירת הזמן היא גם התחלת תהליך הפריקה, יהיה תנאי ההתחלה :

$$t = 0: V = \varepsilon$$

במקרה זה הקבוע B שווה ל- $\varepsilon$ , ותלות המתח על הקבל בזמן היא :

$$V = \varepsilon e^{-\frac{t}{rC}}$$



התוצאות שנתקבלו מצביעות על כך, שתהליכי הטעינה והפריקה (התייצבות שיווי-המשקל החשמלי) אינם מתרחשים באופן מיידי, אלא בקצב סופי. עבור המעגל שניתחנו, המכיל נגד וקבל, קצב ההתייצבות תלוי במכפלה  $\tau = rC$  שיחידותיה כיחידת

הזמן, ומכונה **קבוע הזמן של המעגל או זמן ההתייצבות**.

קבוע הזמן קובע כמה זמן לאחר ניתוק הכא"מ קטן המתח (ובהתאמה, עוצמת השדה בתוך הקבל) פי  $e = 2.72$ . היחידות הפיסיקליות של  $\tau$  הן שניות.

### דוגמאות לפתרון תרגילים

כאשר פותרים תרגילים תוך שימוש בחוק אום, יש לזכור היטב, שבחיבור נגדים בטור שווה עוצמת הזרם בכל המוליכים, ושהמתח בין קצות המקטע שווה לסכום המתחים בכל חלקיו.

בחיבור נגדים במקביל שווה הפרש המתח בקצות כל מוליך, ועוצמת הזרם בקטע הלא מפוצל של המעגל שווה לסכום עוצמות הזרם הזורם בכל הפיצולים. הנוסחאות (15.6), (15.7), (15.9) ו-(15.11) נובעות מחוק אום. עדיף לזכור אותן ולהשתמש בהן במישרין בפתרון התרגילים.

בפתרון תרגילי עבודת הזרם והספקו יש להשתמש בנוסחאות (15.13) ו-(15.15). בתרגילים הקשורים לכא"מ יש לדעת את חוק אום למעגל סגור [ראו נוסחה (15.20)] ואת כלל הסימנים של הכא"מ עבור מעגל, הכולל כמה מקורות זרם.

1. עוצמת הזרם במעגל, הכולל נגד משתנה, היא  $I = 3.2 \text{ A}$ . המתח בין הדקי הנגד

$U = 14.4 \text{ V}$ . מה ההתנגדות של אותו חלק מהנגד שעובר בו זרם?

פתרון

בהתאם לחוק אום:  $I = \frac{U}{R}$ , מכאן:

$$R = \frac{U}{I} = 4.5 \Omega$$

2. מצבר בעל כ"מ  $\varepsilon = 6.0 \text{ V}$  והתנגדות פנימית  $r = 0.1 \Omega$  מספק זרם למעגל

חיצוני, שהתנגדותו  $R = 12.4 \Omega$ . איזו כמות חום  $Q$  תיפלט במעגל כולו בזמן

$t = 10 \text{ min}$ ?

פתרון

בהתאם לחוק אום למעגל סגור, שווה עוצמת הזרם במעגל:  $I = \frac{\varepsilon}{R + r}$ .

כמות החום הנפלטת בקטע החיצוני של המעגל שווה:  $Q_1 = I^2 \cdot R \cdot t$ ,

ובקטע הפנימי:  $Q_2 = I^2 \cdot r \cdot t$ . כמות החום הכוללת היא:

$$Q = Q_1 + Q_2 = I^2 \cdot (R + r) \cdot t = \frac{\varepsilon^2 t}{R + r} \approx 1.7 \text{ kJ}$$

3. לתא גלווני כ"מ  $\varepsilon = 5.0 \text{ V}$  והתנגדות פנימית  $r = 0.2 \Omega$ . התא מקוצר על

מוליך שהתנגדותו  $R = 40 \Omega$ . מהו הפרש המתח  $U$  בין קצות המוליך?

פתרון

על-פי חוק אום לקטע המעגל:  $U = IR$ . עוצמת הזרם במעגל סגור היא:

$$I = \frac{\varepsilon}{R + r} \text{ מכאן מקבלים: } U = \frac{\varepsilon \cdot R}{R + r} \approx 4.97 \text{ V}$$

### מקבץ תרגילים 19

1. האלקטרונים הנעים אל מסך שפופרת הטלוויזיה יוצרים אלומה. לאיזה צד

מכוון הזרם החשמלי באלומה זו? הסבירו.

2. מצאו את שטח החתך ואת אורך תיל העשוי מנחושת, אם ידוע שהתנגדותו

שווה ל-  $0.2 \Omega$  ומסתו  $0.2 \text{ kg}$ .

הצפיפות הסגולית של נחושת היא  $8900 \text{ kg/m}^3$ .

חוקי הזרם הישר – חרגילים ותקציר

3. בין קצות מוליך מנחושת, שאורכו 300 מטר, מופעל מתח של 36 וולט. מצאו את המהירות הממוצעת של תנועת האלקטרונים המכוונת בתוך המוליך, אם ידוע שריכוז האלקטרונים המוליכים בנחושת  $8.5 \cdot 10^{28} \text{ m}^{-3}$ .

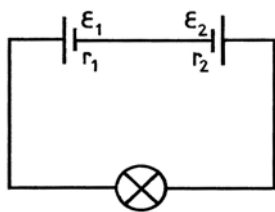
4. בפרק זמן מסוים פלט תנור חשמלי כמות חום  $Q$ . איזו כמות חום יפלטו באותו פרק זמן שני תנורים כאלה, אם הם מחוברים לאותה רשת החשמל בטור? ובמקביל? יש להזניח את שינוי ההתנגדות של גוף החימום עקב שינויי הטמפרטורה.

5. מהו מתח ההדקים של תא גלווני בעל כ"מ  $\varepsilon$  כאשר המעגל פתוח?

6. מהי עוצמת זרם הקצר של מצבר בעל כ"מ של  $\varepsilon = 12 \text{ V}$  והתנגדות פנימית של  $r = 0.01 \Omega$ ?

7. סוללת פנס כיס מקוצרת בנגד משתנה. כאשר ההתנגדות שלו היא  $1.65 \Omega$ , שווה המתח בין קצות הנגד ל-  $3.3 \text{ V}$ ; וכאשר ההתנגדות  $3.5 \Omega$ , שווה המתח ל-  $3.5 \text{ V}$ . מצאו את הכ"מ ואת ההתנגדות הפנימית של הסוללה.

8. תאים גלווניים בעלי כ"מ של 4.5 ו- 1.5 וולט וערכי התנגדות פנימית של 1.5 ו- 0.5 אום, בהתאמה, מחוברים כמתואר בציור 218, ומספקים זרם לנורת חשמל. איזה הספק צורכת הנורה, אם ידוע שהתנגדות חוט הלהט שלה במצב מחומם היא 23 אום?



ציור 218

9. מעגל סגור מקבל זרם ממקור בעל כ"מ  $\varepsilon = 6 \text{ V}$  והתנגדות פנימית  $0.1 \Omega$ . שרטטו גרפים של עוצמת הזרם במעגל ושל מתח ההדקים של המקור בתלות ההתנגדות של הקטע החיצוני.

10. שני מקורות, כל אחד בעל כ"מ  $4.1 \text{ V}$  והתנגדות פנימית  $4 \Omega$ , מחוברים בהדקים בעלי סימן זהה. מכל זוג הדקים יוצא חוט מוליך, וכך נוצרה סוללה. מה צריכים להיות הכ"מ וההתנגדות הפנימית של סוללה שקולה למערך המקורות הנתון?

## תקציר פרק 15

תנועה מכוונת (מסודרת) של חלקיקים טעונים מכונה **זרם חשמל**. עוצמת הזרם שווה ליחס בין המטען  $\Delta q$ , העובר דרך חתך המוליך בפרק זמן  $\Delta t$ , לפרק זמן זה.

עוצמת הזרם נמדדת באמפרים. בהתאם לחוק אום לקטע המעגל:  $I = \frac{U}{R}$ , כאשר:  $U$  – המתח בין קצות הקטע;  $R$  – התנגדות המעגל.

יחידת ההתנגדות במערכת היחידות SI היא אום:  $1 \Omega = \frac{1 \text{ V}}{1 \text{ A}}$ .

במהלך התנועה המסודרת של חלקיקים טעונים במוליך מבצע השדה החשמלי עבודה המכונה **עבודת הזרם**. עבודת הזרם בזמן  $\Delta t$  בקטע המוליך שווה ל-  $A = IU\Delta t$ . כמות החום הנפלטת במוליך נושא זרם מוגדרת על-ידי חוק ג'אול:

$$Q_1 = I^2 \cdot R \cdot \Delta t$$

$$P = \frac{A}{\Delta t} = IU \quad \text{הספק הזרם:}$$

במעגל חשמלי צריכים להיות כוחות זרים מסוג זה או אחר, שאינם פוטנציאליים. הם פועלים בתוך מקור הזרם הכלול במעגל. היחס בין עבודת הכוחות הזרים בהעברת המטען  $q$  לאורך מעגל סגור לבין גודל המטען מכונה **כוח אלקטרומוניע**:

$$\varepsilon = \frac{A_s}{q}$$

עוצמת הזרם במעגל סגור שווה ליחס בין הכא"מ לבין ההתנגדות הכוללת:

$$I = \frac{\varepsilon}{R + r}$$

## פרק 16 זרם חשמל בסוגי תווך שונים

בפרק הזה תכירו תהליכים פיזיקליים, המאפשרים את העברת הזרם בתווך.

### §111 מוליכות חשמלית של חומרים שונים

זרם חשמל עובר דרך חומרים מוצקים, נוזלים וגזים. במה שונים מוליכים אלה זה מזה?

הכרנו את תופעת זרם החשמל במוליכים מתכתיים; הכרנו את תלות המתח בזרם, שנגלתה באופן ניסויי ונוסחה כחוק של אום. כיום עושים שימוש רב ביותר בחוטי מתכת להעברת אנרגיה חשמלית ממקורות הזרם אל הצרכנים. כן משתמשים במוליכים אלה במנועי חשמל ובמחוללים, במכשירי חימום וכדומה.

מלבד המתכות, **מוליכים טובים** – כלומר **חומרים בעלי כמות גדולה של חלקיקים טעונים חופשיים** – הם **תמיסות או תרכובות על בסיס מים של אלקטרוליטים וגז מיון המכונה פלזמה**. גם במוליכים אלה נמצא שימוש רב בטכנולוגיה.

**במכשירים אלקטרוניים, הבנויים על בסיס שפופרות ריק, מהוות אלומות של אלקטרונים את זרם החשמל.**

לצד המוליכים, מחד, והחומרים הדיאלקטריים (חומרים בעלי כמות קטנה של חלקיקים טעונים חופשיים), מאידך, קיימת קבוצה של חומרים בעלי מוליכות ביניים, התופסת את מקומה בין המוליכים לבין החומרים הדיאלקטריים. חומרים אלה אינם מוליכי חשמל מובהקים, וכך לא ניתן לשייכם למוליכים – אולם גם לא כה בלתי מוליכים, שניתן יהיה לשייכם לחומרים הדיאלקטריים. לכן מכונים הם **מוליכים למחצה**.

עד לעת האחרונה לא נמצאו למוליכים למחצה שימושים מעשיים. הן בהנדסת החשמל הן בהנדסת הרדיו השתמשו באופן בלעדי במוליכים, מחד, ובחומרים דיאלקטריים שונים, מאידך. המצב השתנה לחלוטין – כאילו התחוללה מהפכה בהנדסת הרדיו – כאשר תחילה באופן תיאורטי, ולאחר מכן באופן ניסויי, גילו ופיתחו את הדרך לשליטה על מידת המוליכות החשמלית של מוליכים למחצה.

זרם חשמל בסוגי תווך שונים

במוליכים משתמשים כדי להעביר אנרגיה חשמלית בחוטים. במוליכים למחצה משתמשים ברכיבים, המשנים את עוצמת הזרם במקלטי רדיו, במחשבים וכדומה.

?

1. מנו מולכים טובים של זרם חשמלי.
2. במה שונים מוליכים ממוליכים למחצה?

### §112 הולכה אלקטרונית של מתכות

נתחיל ממוליכים מתכתיים; ידועה לנו תלות הזרם במתח במוליכים אלה, אולם עד כה לא דיברנו על ההסבר לתלות זו מנקודת מבטה של התורה המולקולרית.

נשאי המטענים החופשיים במתכות הם האלקטרונים. ריכוזם גבוה: סדר גודל של  $10^{28} \text{ 1/m}^3$ . האלקטרונים משתתפים בתנועה תרמית בלתי מסודרת. בהשפעת השדה החשמלי הם מתחילים לנוע באופן מסודר במהירות ממוצעת של  $10^{-4} \text{ m/sec}$ .

#### ההוכחה הניסויית לקיומם של אלקטרונים חופשיים במתכות

ההוכחה הניסויית שמקור ההולכה של מתכות הוא בתנועת אלקטרונים חופשיים ניתנה בניסויים של מנדלשטם ופלקסי (1913) וסטוארט ותולמן (1916).

#### לאוניד מנדלשטם (1879 – 1944)



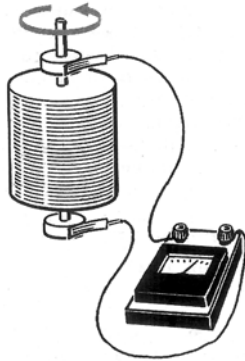
פיזיקאי סובייטי. חבר האקדמיה למדעים. תרם רבות לפיתוח תורת התנודות, לרדיופיזיקה ולאופטיקה. עם חבר האקדמיה, פרופ' ג' לנדסברג, גילה את תופעת פיזור האור בגבישים, המלוּנה בשינוי התדר של האור (הפיזור המשולב). מנדלשטם ייסד כיוון מדעי חדש בפיזיקה הסובייטית. עם תלמידיו נמנים חברי אקדמיה רבים ואחרים.

מערך הניסוי היה כדלקמן:

מלפנים תיל על מעטפתו של גליל, ולקצותיו מלחימים שתי דסקות מתכתיות המבודדות זו מזו (ציור 219). מחברים גליונומטר אל קצות הדסקות באמצעות מגעים צמודים.

מסובבים מהר את הגליל, ועוצרים אותו בפתאומיות. עם העצירה נעים החלקיקים הטעונים בתוך התיל משום תכונת ההתמדה, וכך נוצר זרם חשמל

זרם חשמל בסוגי חוּך שונים



בסליל. הזרם נפסק לאחר זמן לא רב, מכיוון שעקב התנגדותו של התיל מאיטים החלקיקים הטעונים את תנועתם, והתנועה המסודרת של חלקיקים יוצרי הזרם נפסקת.

מגמת הזרם מאפשרת לקבוע שהזרם אכן נוצר על-ידי תנועה של חלקיקים שליליים. המטען המועבר פרופורציונלי ליחס בין מטען החלקיק לבין מסתו, כלומר ל-  $\frac{|q|}{m}$ . לכן על-ידי מדידת המטען, העובר דרך

ציור 219

הגלונומטר בזמן קיום הזרם במעגל, ניתן לגלות

יחס זה. נמצא שערכו שווה ל-  $\frac{e}{m} = 1.8 \cdot 10^{11} \frac{C}{kg}$  – כערך הזהה ליחס שבין מטען האלקטרון לבין מסתו,  $e/m$ , שנמצא בניסויים קודמים.

#### תנועת האלקטרונים במתכת

בהשפעת הכוח הקבוע, הפועל עליהם מצדו של השדה החשמלי, מוענקת לאלקטרונים מהירות מסוימת של תנועה מסודרת. מהירות זו אינה גדלה במשך הזמן, מכיוון שהיונים של הסריג הגבישי מפעילים על האלקטרונים כוח בלימה מסוים. כוח זה דומה לכוח הבלימה, שמפעילים המים על אבן השוקעת בהם. כתוצאה מכך נמצאת המהירות הממוצעת של התנועה המסודרת של האלקטרונים ביחס ישר לעוצמת השדה החשמלי במוליך:  $v \sim E$ ; וכמשתמע מהקשר שבין המתח לעוצמת השדה –  $E = \frac{U}{l}$  (כאשר:  $l$  – אורך המוליך) – נמצאת המהירות הממוצעת של התנועה המסודרת של האלקטרונים ביחס ישר להפרש המתח שבין קצות המוליך.

אנו יודעים, שעוצמת הזרם במוליך פרופורציונלית למהירות התנועה המסודרת של החלקיקים [ראו נוסחה (15.2)]. לכן ניתן לומר שעוצמת הזרם פרופורציונלית להפרש הפוטנציאלים על קצות המוליך:  $I \sim U$ . זהו ההסבר האיכותי של חוק אום, המבוסס על תורת ההולכה האלקטרונית של המתכות.

אי-אפשר לפתח את התורה הכמותית המדויקת של התנהגות האלקטרונים

במתכות על בסיס משוואות המכניקה הקלאסית, כי המכניקה הקלאסית של ניוטון אינה מסוגלת לתאר את אופי התנועה של האלקטרונים במתכת. הדוגמה הבאה מבהירה עובדה זו.

אם נמדוד באופן ניסויי את האנרגיה הקינטית הממוצעת של התנועה התרמית של האלקטרונים במתכת בטמפרטורת החדר, ונמצא את הטמפרטורה המתאימה לאנרגיה זו לפי הנוסחה  $\frac{mv^2}{2} = \frac{3}{2} kT$ , נקבל טמפרטורה בסדר גודל של  $10^5$  עד  $10^6$  K. טמפרטורה כזאת קיימת בתוך הכוכבים. תנועת האלקטרונים במתכות מתוארת על-ידי חוקי המכניקה של הקוונטים.

הוכח באופן ניסויי שנשאי המטענים החופשיים במתכות הם האלקטרונים. בהשפעת השדה החשמלי נעים האלקטרונים במהירות ממוצעת קבועה עקב הבלוימה מצדו של הסריג הגבישי. מהירות התנועה המכוונת פרופורציונלית לעוצמת השדה במוליך.

?

1. הסליל (ראו ציור 219) הסתובב בכיוון מגמת השעון, ולאחר מכן נבלם בפתאומיות. מצאו את כיוון הזרם החשמלי בסליל ברגע הבלוימה.
2. כיצד תלויה מהירות התנועה המכוונת של האלקטרונים במוליך מתכתי במתח שבין קצות המוליך?

### §113 תלות התנגדות המוליך בטמפרטורה

לחומרים שונים התנגדות סגולית שונה (ראו סעיף 106). האם תלויה התנגדות המוליך בטמפרטורה? ניסוי עשוי לספק את התשובה.

באמצעות מצבר נעביר זרם דרך סליל פלדה ונצפה באמפרמטר. נחמם את הסליל באש להבה, וניווכח שהאמפרמטר יציג הקטנה של עוצמת הזרם. אם מתח המצבר מיוצב, אין מנוס מלהסיק, שעם שינוי הטמפרטורה משתנה התנגדות המוליך.

אם התנגדות המוליך שווה ל-  $R_0$  בטמפרטורה של  $0^\circ\text{C}$ , ובטמפרטורה  $t$  היא

זרם חשמל בסוגי חוץ שונים

שווה ל- $R$ , נמצא השינוי של ההתנגדות, כפי שמראה הניסוי, ביחס ישר לשינוי הטמפרטורה  $t$ :

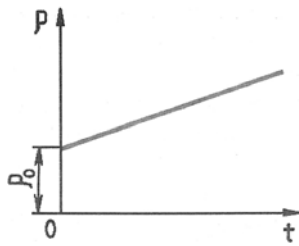
$$(16.1) \quad \frac{R - R_0}{R} = \alpha t$$

**מקדם  $\alpha$  מכונה מקדם הטמפרטורה של ההתנגדות, והוא מאפיין את תלות ההתנגדות החומר בטמפרטורה. מקדם הטמפרטורה של ההתנגדות שווה לשינוי היחסי של ההתנגדות המוליך, כאשר הוא מתחמם ב- $1 \text{ K}$ . לכל המוליכים המתכתיים  $\alpha > 0$ , וערכו כמעט אינו משתנה עם שינוי הטמפרטורה. אם תחום שינוי הטמפרטורה אינו גדול, שווה מקדם הטמפרטורה של ההתנגדות בקירוב לערכו הממוצע בתחום זה. עבור מתכת טהורה ערכו של מקדם טמפרטורה זה הוא:  $\alpha \approx \frac{1}{273} \text{ K}^{-1}$ . ההתנגדות של תמיסות של אלקטרוליטים אינה גדלה, אלא קטנה עם העלאת הטמפרטורה; עבורן  $\alpha < 0$ . לדוגמה: עבור תמיסת מלח שולחן בעלת ריכוז של 10%:  $\alpha = -0.02 \text{ K}^{-1}$ .**

כאשר מחממים את המוליך, משתנות מידותיו הגיאומטריות באורח לא משמעותי. אם כך, ההתנגדות משתנה עקב שינוי ההתנגדות הסגולית. אפשר למצוא את תלות ההתנגדות הסגולית בטמפרטורה, אם נציב בנוסחה (16.1) את הערכים של  $R = \rho \frac{l}{S}$  ו-  $R_0 = \rho_0 \frac{l}{S}$ . לאחר החישובים מקבלים:

$$(16.2) \quad \rho = \rho_0(1 + \alpha t)$$

מכיוון ש- $\alpha$  משתנה מעט עקב שינוי טמפרטורת המוליך, אפשר לומר שתלות ההתנגדות הסגולית של מוליך בטמפרטורה היא קווית (ציור 220). אף שמקדם הטמפרטורה  $\alpha$  קטן, יש להביא בחשבון את תלות ההתנגדות בטמפרטורה בתנורי חימום חשמליים, למשל; התנגדות חוט הלהט העשוי מוולפרם בנורת הלהט גדלה עקב ליבונה יותר מפי 10.



ציור 220

לסגסוגות מסוימות של מתכות – לדוגמה של נחושת וניקל (קונסטאנטאן) – מקדם הטמפרטורה של ההתנגדות קטן מאוד:  $\alpha \approx 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ ; ההתנגדות הסגולית של קונסטאנטאן גדולה:  $\rho \approx 10^{-6} \Omega \cdot \text{m}$ .

בסגסוגות אלה משתמשים בייצור נגדי תקן למכשירי מדידה, כלומר כאשר נדרש שההתנגדות לא תשתנה באופן משמעותי עקב שינויי הטמפרטורה. בתכונת התלות של ההתנגדות המתכות בטמפרטורה משתמשים במדי-טמפרטורה מבוססי נגד. בדרך כלל משמש כרכיב הפעיל העיקרי של מד-טמפרטורה שכזה חוט פלטינה, שתלות ההתנגדותו בטמפרטורה ידועה היטב. על שינוי הטמפרטורה מסיקים משינוי ההתנגדות, אותה ניתן למדוד בקלות. מדי-טמפרטורה אלה מאפשרים למדוד טמפרטורות נמוכות מאוד וגם גבוהות מאוד, כאשר מדי-טמפרטורה נוזליים אינם יעילים משום קפיאת הנוזל או משום רתיחתו.

ההתנגדות הסגולית של המתכות גדלה בתלות קווית (ליניארית) עם הטמפרטורה; בתמיסות אלקטרוליטים היא קטנה עם העלאת הטמפרטורה.

?

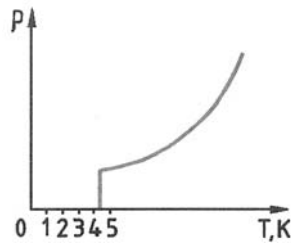
1. מתי צורכת נורת חשמל הספק גדול יותר: מייד לאחר ההדלקה או כעבור זמן-מה? הסבירו.
2. אילו לא היתה משתנה ההתנגדות הסליל של גוף חימום חשמלי עם עליית הטמפרטורה, האם היה נחוץ להאריך את חוט הלהט או לקצרו כדי לשמור על הספקו הנומינלי?

#### §114 על-מוליכות

התנגדות המוליכים תלויה במידת האנרגיה הפנימית האצורה בחומר המוליך, ואמת-מידה לה היא הטמפרטורה. עם שלילת החום מחומר מוליך – ובעקבות כך ירידה בטמפרטורה שלו – משתנה ההתנגדותו; ההתנגדות המתכות הולכת וקטנה עם שלילת חומן. כיצד תשתנה מוליכות המתכת, כאשר עקב קירורה תגיע הטמפרטורה לסף האפס המוחלט?

זרם חשמל בסוגי חוץ שונים

בשנת 1911 גילה הפיזיקאי ההולנדי קְמֶרְלינג-אוֹנס תופעה מיוחדת: **על-מוליכות**. הוא גילה, שבמהלך התקררות הכספית בהליום נוזלי פוחתת תחילה ההתנגדות באטיות, ולאחר מכן – בטמפרטורה של  $4.1\text{ K}$  – צונחת ההתנגדות באופן חד עד לאפס (ציור 221). תופעה זו מכונה: **על-מוליכות**. מאוחר יותר נתגלו חומרים אחרים בעלי תכונת שינוי בהתנגדות דומה.



ציור 221

על-מוליכות מתגלה בטמפרטורות נמוכות מאוד, קרוב ל- $25\text{ K}$ . בטבלאות ניתן למצוא את טמפרטורות המעבר למצב על-מוליך של חומרים שונים.

אם ניצור זרם בטבעת מוליכה שעברה למצב על-מוליך, ולאחר מכן נסלק את מקור הזרם, לא תשתנה עוצמת הזרם לעולם; ואילו במוליך רגיל ייפסק הזרם מיד.

לעל-מוליכים נמצא שימוש רחב בטכנולוגיה. כך בונים אלקטרו-מגנטים חזקים בעלי סלילים על-מוליכים, היוצרים שדה מגנטי לאורך פרקי זמן ממושכים ללא צריכת תוספת אנרגיה, שהרי בסליל על-מוליך לא נברא חום.

אולם אי-אפשר ליצור בעזרת על-מוליך שדה מגנטי בעוצמה גדולה, שכן שדה מגנטי חזק מאוד הורס את מצב העל-מוליכות של המוליך; שדה חזק שכזה יכול להיווצר רק על-ידי זרם העובר בעל-מוליך עצמו, ולכל מוליך במצב של על-מוליכות קיים ערך גבולי מרבי של עוצמת זרם, ולא ניתן לחרוג ממנו מבלי להרוס את מצב של העל-מוליכות של המוליך.

מגנטים על-מוליכים משמשים במאיצים של חלקיקי יסוד, במחוללים מגנטו-הידרו-דינמיים, ההופכים את האנרגיה המכנית של זרם הגז המיונן, העובר בשדה מגנטי, לאנרגיה חשמלית.

אילו היו מצליחים ליצור חומרים על-מוליכים בטמפרטורות הקרובות לטמפרטורת החדר, היתה נפתרת בעיה טכנית בעלת חשיבות עליונה: העברת אנרגיה בחוטי חשמל ללא איבודים. פיזיקאים טורחים עתה על פתרונה.

הסבר תופעת העל-מוליכות מתבסס על המכניקה הקוונטית. ההסבר ניתן בשנת

**זרם חשמל בסוגי חוץ שונים**

1957 על-ידי המדענים האמריקאיים ג' ברדין, ל' קופר וג' שריפר, והפיזיקאי הסובייטי בוגולובוב.

בשנת 1986 גילו תכונת על-מוליכות בטמפרטורה גבוהה יותר: המדענים יצרו סגסוגות מורכבות מסוג אוקסידים של לנטאן, בריום ויסודות אחרים (קרמיקות) בעלות טמפרטורת מעבר למצב על-מוליך: קרוב ל-100 K.

בעתיד הקרוב יוביל מחקר בעניין העל-מוליכות בטמפרטורה גבוהה למהפכה בכל תחומי האלקטרוטכניקה, הרדיו והמחשבים. ההתקדמות היישומית בתחומים אלה נבלמת עקב הצורך בקירור המוליכים עד לטמפרטורות הרתיחה של גז יקר: ההליום.

יש לקוות שיצליחו ליצור על-מוליכים בטמפרטורת החדר. אז יוקטנו גנרטורים ומנועי חשמל למידות קומפקטיות ויהיו חסכוניים הרבה יותר; וניתן יהיה להעביר אנרגיית החשמל למרחוק בלא הפסדים.

מתכות וסגסוגות רבות בטמפרטורות הנמוכות מ-25 K מאבדות את תכונת ההתנגדות לזרם חשמלי, והופכות לעל-מוליכים. לא מזמן גילו את תופעת העל-מוליכות בטמפרטורות גבוהות יותר.

?

1. מה הקשיים הטכניים העיקריים בשימוש בעל-מוליכים?
2. כיצד לוודא שבעל-מוליך טבעתי מתייצב זרם חשמלי קבוע?

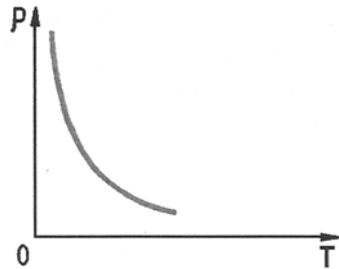
### §115 זרם חשמל במוליכים למחצה

מה ההבדל העיקרי בין המוליכים לבין המוליכים למחצה? אילו תכונות מבנה של המוליכים למחצה סללו את הדרך למכשירי הרדיו, לטלוויזיה ולמחשבים?

ההבדל הבולט ביותר בין המוליכים למחצה לבין המוליכים הוא בתלות מידת ההולכה החשמלית באנרגיה הפנימית האצורה בס, ובעקיפין – בתלות אמת-המידה למידת האנרגיה הפנימית, כלומר הטמפרטורה של המוליך. המדידות מראות שבשורה של יסודות (סיליקון, גרמניום, סלן ועוד) ותרבות (CdS, PbS ואחרות) אין ההתנגדות הסגולית גדלה עם עליית הטמפרטורה כפי שנחזה במתכות (ראו

זרם חשמל בסוגי חוץ שונים

ציור 220), אלא להפך: היא הולכת וקטנה באופן חד (ציור 222). חומרים אלה מכונים **מוליכים למחצה**.



ציור 222

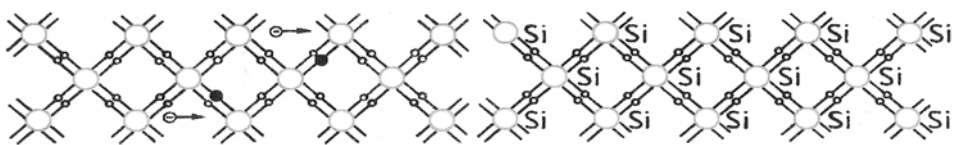
הגרף המצויר מראה, שבטמפרטורות הקרובות לאפס מוחלט גדולה מאוד ההתנגדות הסגולית של המוליכים למחצה; בטמפרטורות נמוכות מתנהג המוליך למחצה כמבודד; ועם עליית הטמפרטורה הולכת וקטנה ההתנגדותו הסגולית בקצב מהיר.

### המבנה של מוליכים למחצה

כדי להדליק מקלט רדיו אין צורך בידע רחב; אולם כדי לייצרו היה צריך לדעת הרבה מאוד ולהצטיין בכישרון רב. ננסה להבין כיצד פועל טרנזיסטור, אך תחילה יש להכיר את **מנגנון העברת המטענים** במוליכים למחצה. לצורך זה נתעמק בטבע הקשרים, שבעזרתם מוחזקים זה ליד זה האטומים של גביש המוליך למחצה. לדוגמה: נתבונן בגביש של צורן (סיליקון, Si).

צורן הוא יסוד בעל ערכיות 4: בקליפה החיצונית של האטום נמצאים ארבעה אלקטרונים, הקשורים לגרעין בכוח חלש. מספר השכנים הקרובים לכל אטום הוא ארבע. ציור 223 מתאר באופן סכמתי ובשני ממדים את מבנה הגביש של צורן.

הקשר ההדדי בין זוג אטומים שכנים מתקיים בעזרת הקשר הדו-אלקטרוני, המכונה **הקשר הקוֹוֹלֵנְטִי**. ביצירת קשר זה משתתף אלקטרון אחד (אלקטרון הערכיות) מכל אטום, המתנתק מהאטום ונעשה "משותף" לכל הגביש, ורוב הזמן נמצא במרחב בין האטומים השכנים. המטען השלילי של האלקטרונים ה"משותפים" – הוא שמחזיק את היונים החיוביים של הצורן זה ליד זה.



ציור 224

ציור 223

טעות היא לחשוב, שזוג האלקטרונים ה"משותפים" שייך לשני אטומים בלבד; כל אטום יוצר ארבעה קשרים עם אטומים שכנים, וכל אלקטרון ערכיות יכול לנוע

זרם חשמל בסוגי חוֹך שונים

לכל אטום שכן, וכך הלאה לאורך כל הגביש. אלקטרוני הערכיות שייכים, אם כן, לכל הגביש.

הקשרים הדו-אלקטרוניים של הצורן חזקים דים בטמפרטורות נמוכות ולא "נקרעים" מסביבתם. לכן אין צורן מוליך זרם חשמל בטמפרטורה נמוכה. אלקטרוני הערכיות יוצרים קשרים בין-אטומיים הקשורים חזק לסריג הגביש, ושדה חשמלי חיצוני כמעט שאינו משפיע על תנועתם. מבנה דומה יש גם לגביש של גרמניום, למשל.

### ההולכה האלקטרונית

כאשר הצורן מתחמם, הולכת וגדלה האנרגיה הקינטית של החלקיקים, וקשרים בודדים נקרעים. חלק מהאלקטרונים עוזבים את "הדרכים המוכרות" שבקשרים הדו-אלקטרוניים ונעשים חופשיים, בדומה לאלקטרונים שבמתכת. הם נעים בין צומתי הסריג בשדה חשמלי ויוצרים זרם חשמל (ציור 224).

### המוליכות החשמלית של מוליכים למחצה נובעת מהימצאותם של אלקטרונים

חופשיים; מוליכות זו מכונה **מוליכות אלקטרונית**. תוך כדי התחממות גדל מספר הקשרים הקרועים, ועמם גדל גם מספר האלקטרונים החופשיים. בהתחממות מ- 300K עד 700K גדל מ-  $10^{17}$  ל-  $10^{24} \frac{1}{m^3}$  מספר נשאי מטען חופשיים. תופעה זו מביאה להפחתת ההתנגדות החשמלית.

### הולכה על-יד חורים

כאשר הקשר נקרע, נשאר מקום פנוי, וחסר בו אלקטרון. מקום כזה מכונה **חור**. ניתן לומר ש**חור** נושא מטען חיובי עודף בהשוואה לקשרים "רגילים" אחרים (ראו ציור 224).

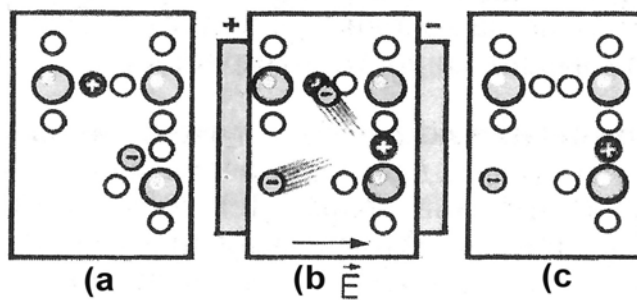
מיקום החור בגביש אינו נשאר קבוע, כי ללא הרף מתרחש התהליך הבא: אחד האלקטרונים, המשתתפים ביצירת הקשר הבין-אטומי, "קופץ" למקום החור הנוצר ומחדש את הקשר הדו-אלקטרוני – אולם במקום שממנו בא נוצר חור חדש. באופן כזה עשוי החור "לנוע" לאורך הגביש.

אם עוצמת השדה החשמלי בתוך הגביש שווה לאפס, אזי "תנועת" החורים, השקולה לתנועת המטענים החיוביים, בלתי מסודרת ואינה גורמת להיווצרות זרם חשמל. כאשר מופעל שדה חשמלי חיצוני, נעשית תנועת החורים מסודרת, ולזרם

זרם חשמל בסוגי חוץ שונים

החשמל של אלקטרונים חופשיים מתוסף הזרם הקשור לתנועת החורים. מגמת תנועת החורים נגדית למגמת תנועת האלקטרונים. מנגנוני ההולכה האלקטרונית ושל זו הנגרמת על-ידי החורים מתוארים בציור 225.

בהעדר שדה חיצוני קיים אלקטרון חופשי אחד (-) וחור אחד (+) (a). בהפעלת השדה נע האלקטרון החופשי נגד מגמת השדה (b), ומשמעה: "תנועת" החור במגמת השדה (c).



ציור 225

לסיכום: בתוך המוליכים למחצה קיימים נשאי מטענים משני סוגים: אלקטרונים וחורים. לכן מוליכים למחצה הם בעלי מוליכות הן אלקטרונית והן "חורית".

עד כה עסקנו במנגנוני ההולכה בגבישים "טהורים". הולכה בתנאים אלה מכונה **הולכה עצמית של מוליך למחצה**.

הולכה של מוליכים למחצה "טהורים" (מוליכות עצמית) מתבצעת באמצעות תנועה של אלקטרונים חופשיים (מוליכות אלקטרונית) ותנועה של אלקטרונים, המדלגים בין המקומות הפנויים של קשרים דו-אלקטרוניים מתפנים (מוליכות "חורית").

?

1. מהו הקשר הקוולנטי?
2. במה נבדלת תלות המוליכות בטמפרטורה של מוליכים למחצה מזו של מתכות?

זרם חשמל בסוגי חוור שונים

3. אילו נשאי מטענים נמצאים במוליכים למחצה טהורים?

4. מה קורה במפגש אלקטרון עם חור?

### §116 הולכה חשמלית של מוליכים למחצה בנוכחות סיגים

ההולכה החשמלית של מוליכים למחצה תלויה בנוכחות סיגים בחומר המוליך. הודות לתלות זו משמשים מוליכים למחצה בתפקיד מרכזי בהנדסת האלקטרוניקה בת-זמננו.

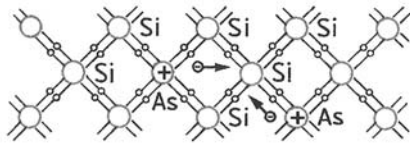
בדרך כלל קטנה ההולכה העצמית של מוליכים למחצה, מכיוון שקטן מספרם של האלקטרונים החופשיים; כך בגרמניום בטמפרטורת החדר:  $n_e = 3 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ , בעוד שמספר האטומים ב-  $1 \text{ cm}^3$  של גרמניום הוא בסדר גודל של  $10^{23}$ . מספר האלקטרונים החופשיים, אם כן, הוא בערך 1 ל-10 מיליארד ממספר האטומים במוליך למחצה.

למוליכים למחצה תכונה חשובה נוספת: במקביל להולכה העצמית בחומרים שאינם טהורים מופיעה הולכה נוספת: "מוליכות" סיגית. על-ידי שינוי מבוקר של ריכוז הסיגים ניתן לשנות באורח משמעותי את מספר נשאי המטענים החיובי והשלילי. הודות לכך ניתן ליצור מוליכים למחצה בעלי ריכוז מועדף של נשאים חיוביים או שליליים. תכונה הזאת פותחת אפשרויות מגוונות לשימוש במוליכים למחצה.

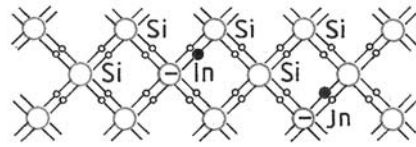
#### סיגים "תורמים"

מסתבר שנוכחות סיגים – למשל: אטומים של ארסן (As) – אף אם בריכוז נמוך מאוד, גורמת לגידול חד במספר האלקטרונים החופשיים במוליך למחצה. הסיבה לכך היא זו: לאטומים של ארסן חמישה אלקטרוני ערכיות. ארבעה מהם משתתפים ביצירת הקשר הקוולנטי של האטום הנתון עם האטומים השכנים של צורן, למשל – ואילו האלקטרון החמישי נשאר קשור באופן חלש באטום הארסן, נוטש אותו ונעשה חופשי (ציור 226). לאחר הוספת ארסן למסג בריכוז של חלק אחד ל-10 מיליונים, שווה ריכוז האלקטרונים חופשיים ל-  $10^{16} \text{ cm}^{-3}$ . מספר זה גדול פי 1000 מריכוז האלקטרונים החופשיים במוליך למחצה טהור.

זרם חשמל בסוגי חוור שונים



ציור 226



ציור 227

הסיגים, שמשחררים אלקטרונים בקלות יחסית – וכתוצאה מכך מגדילים את מספרם של האלקטרונים החופשיים – מכונים **סיגים "תורמים" (נותנים)**. מכיוון שבמוליכים למחצה בעלי סיגים תורמים גדול מספר האלקטרונים ממספר החורים, מכונים הם **מוליכים למחצה מסוג n** (מהמילה האנגלית negative – שלילי).

במוליך למחצה מסוג n הנשאים העיקריים של המטען הם האלקטרונים, והחורים הם נשאי המטען המשניים.

### סיגים "קולטים"

אם מכניסים למסג אינדיום (In) – יסוד בעל ערכיות 3 – משתנה אופי המוליכות החשמלית של המוליך למחצה. במקרה זה חסר אלקטרון אחד ליצירת הקשרים הזוגיים עם האטומים השכנים לאטום של האינדיום, כלומר נוצר חור. מספר החורים בגביש שווה למספר האטומים של הסיג (ציור 227). סיגים מסוג זה מכונים **אקספטורים (קולטים)** (מהמילה האנגלית accept: לקבל, לקלוט). בשדה חשמלי חיצוני נעים החורים במגמת השדה ויוצרים את ההולכה ה"חורית". המוליכים למחצה בעלי המוליכות העודפת של חורים (יחסית לאלקטרונים) מכונים **מוליכים למחצה מסוג p** (positive: חיובי). נשאי המטענים העיקריים בחומר מסוג זה הם החורים, והנשאים המשניים הם האלקטרונים.

הסיגים ה"תורמים" מוסרים את אלקטרוני הערכיות המיותרים, וכך נוצר מוליך למחצה מסוג n. הסיגים ה"קולטים" יוצרים את החורים, וכך נוצר מוליך למחצה מסוג p.

?

1. כיצד תלויה ההתנגדות החשמלית של מוליך למחצה בנוכחות סיגים בחומר המוליך?

זרם חשמל בסוגי חוור שונים

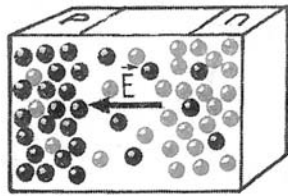
2. אילו הם נשאי המטען העיקריים במוליך למחצה בעל סיג "קולט" ?

3. איזה סיג יש להחדיר לחומר המוליך כדי ליצור מוליך למחצה

מסוג n ?

**§117 זרם חשמל דרך משטח המגע שבין שני סוגים של מוליכים למחצה**

התופעות המעניינות ביותר מתרחשות באזור המגע שבין שני סוגי המוליכים למחצה: סוג n וסוג p. בתופעות אלה משתמשים ברוב המכשירים, המבוססים על מוליכים למחצה.

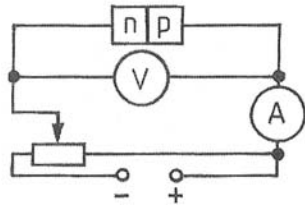


ציור 228

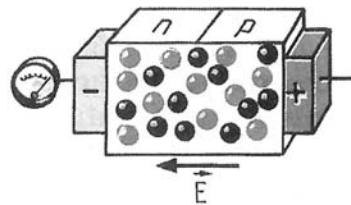
בציור 228 מתואר מוליך למחצה כזה: החלק הימני שלו מכיל סיגים "תורמים", ולכן הוא מהווה מוליך למחצה מסוג n; והחלק השמאלי מכיל סיגים "קולטים", ולכן הוא מהווה מוליך למחצה מסוג p. האזור ביניהם הוא אזור המעבר.

האלקטרונים מתוארים על-ידי עיגולים בהירים, והחורים – על-ידי עיגולים כהים. משטח המגע בין שני מוליכים למחצה מכונה **צומת n – p**.

כאשר נוצר מגע בין שני החלקים, עובר חלק מהאלקטרונים מהמוליך למחצה מסוג n למוליך למחצה מסוג p, והחורים עוברים במגמה ההפוכה. כתוצאה מכך נטען המוליך למחצה מסוג n במטען חיובי, וזה מהסוג p נטען במטען שלילי. מעבר המטענים פוסק כאשר השדה החשמלי, שנוצר באזור המעבר, מונע את המשך התנועה של האלקטרונים ושל החורים.



ציור 229

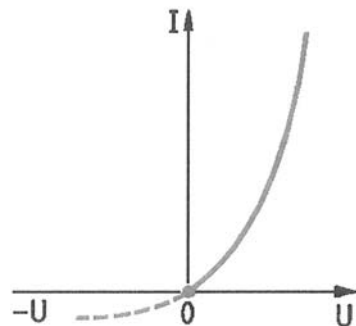


ציור 230

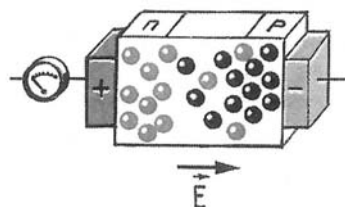
**זרם חשמל בסוגי חוור שונים**

נחבר את המוליך למחצה, הכולל צומת n-p, למעגל חשמלי (ציור 229). תחילה נחבר את הסוללה, כך שפוטנציאל המוליך למחצה מסוג p יהיה חיובי, וזה של הסוג n – שלילי. במצב זה יהיו נשאי הזרם (המכונים **נשאים עיקריים**) דרך הצומת n – p כדלקמן: מאזור n לאזור p – האלקטרונים, ומאזור p לאזור n – החורים (ציור 230). בעקבות תהליך זה תהיה מוליכות הגביש גבוהה, והתנגדותו קטנה.

המעבר המתואר מכונה **מעבר ישיר**. התלות של עוצמת הזרם בהפרש הפוטנציאלים – הגרף וולט-אמפר – מתוארת בציור 231 כקו ישר.



ציור 231



ציור 232

עתה נהפוך את קוטבי הסוללה. עבור אותו הפרש פוטנציאלים תהיה עוצמת הזרם במעגל קטנה בהרבה מאשר במעבר הישיר, כי האלקטרונים עוברים דרך הצומת מאזור p לאזור n, והחורים – מאזור n לאזור p; אולם במוליך למחצה מסוג p מעטים האלקטרונים החופשיים, ובמוליך למחצה מסוג n מעטים החורים. כעת המעבר דרך הצומת מתבצע על-ידי נשאים משניים, שמספרם קטן (ציור 232). בעקבות זאת תהיה מוליכות הגביש קטנה, והתנגדותו גבוהה. נוצרת שכבה המכונה **שכבת עצירה**. המעבר מסוג זה מכונה **מעבר הפוך**. גרף וולט-אמפר של מעבר הפוך מתואר בציור 231 בקו מרוסק.

הצומת n-p איננו סימטרי לגבי הזרם: במגמה הישירה התנגדות הצומת נמוכה בהרבה מזו שבמגמה ההפוכה.

זרם חשמל בסוגי חוץ שונים



1. מה מתרחש באזור המגע שבין שני מוליכים למחצה מהסוגים n ו-p?
2. מהי שכבת העצירה?
3. איזה צומת מכונה "ישיר"?

### §118 דיודה ממוליך למחצה

הרכיב העיקרי של מיישרי זרם חילופין הוא דיודה, העשויה ממוליך למחצה. כיצד היא בנויה?

את מקומן של השפופרות בנות שתי אלקטרודות, המשמשות לצורך יישור הזרם במעגלי הרדיו, תפסו דיודות הבנויות ממוליכים למחצה, מכיוון שלא היתה שורה של יתרונות בולטים. בשפופרת הרדיו נשאי הזרם הם אלקטרונים הנוצרים בעקבות חימום הקתודה; לצורך זה נחוץ מקור אנרגיה חשמלי.

בצומת n-p נוצרים נשאי המטען על-ידי החדרת סיגים תורמים או קולטים בגביש. באופן זה מתבטל הצורך במקור אנרגיה ליצירת נשאי המטען החופשיים. במעגלים מורכבים עשוי החיסכון באנרגיה המתקבל להיות משמעותי ביותר. כמו כן המיישרים, הבנויים ממוליכים למחצה, קטנים בהרבה מאלה הבנויים משפופרות אלקטרוניות.

יתרונות אלה של הרכיבים ממוליכים למחצה משמעותיים בעיקר בשימושיהם בלוויינים, במעבורות חלל ובמחשבים.

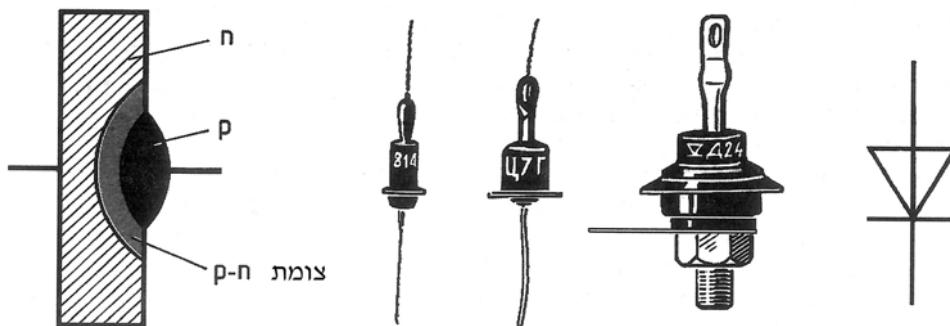
את הדיודות ממוליכים למחצה מייצרים מגרמניום, מצורן, מסלן ומחומר אחרים.

נלמד כיצד נוצר צומת n-p, כאשר משתמשים בגרמניום – בעל מוליכות מהסוג n - באמצעות תוספת קטנה של סיג תורם. אי-אפשר ליצור צומת כזה על-ידי הצמדה מכנית של שני מוליכים למחצה בעלי מוליכות מסוג שונה, מכיוון שכך נוצר מרווח גדול מדי בין המוליכים למחצה. עובי הצומת n-p חייב להיות בסדר גודל של המרחקים שבין האטומים, ולכן מחדירים אינדיום באחד ממשטחי הגביש. בעקבות החדירה (הדיפוזיה) של אטומי אינדיום לעומק גביש הגרמניום נוצר ליד

זרם חשמל בסוגי חוץ שונים

משטח הגרמניום אזור בעל מוליכות מסוג p. חלק מגביש הגרמניום, שאליו לא חדרו אטומים של אינדיום, נשאר בעל מוליכות מסוג n. בין שני האזורים בעלי המוליכות מהסוג השונה נוצר צומת n-p (ציור 233). בדיודה זו משמש הגרמניום כקתודה, והאינדיום – כאנודה.

כדי למנוע את ההשפעות המזיקות של האור ושל האוויר, אטמים את הגביש במעטפת מתכתית (ציור 234א). הסימן הסכמתי של דיודה מובא בציור 234ב. המיישרים ממוליכים למחצה הם בעלי אמינות גבוהה ואורך חיים רב; אולם הם עשויים לתפקד בטווח טמפרטורות מוגבל: מ-70° עד ל-125°C.



ציור 233

(א)

ציור 234

(ב)

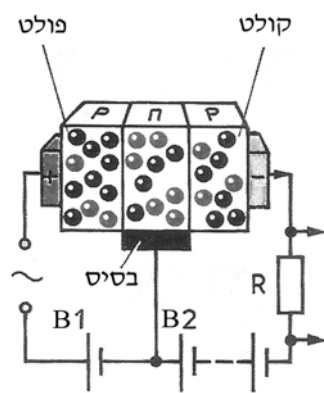
בתכונות הצומת n-p משתמשים לצורך יישור של זרם חילופין: במשך מחצית המחזור, כאשר הפוטנציאל של המוליך למחצה מסוג p חיובי, זרם הזרם חופשית דרך הצומת n-p; ובמהלך מחצית השנייה של המחזור ישווה הזרם לאפס.

### §119 טרנזיסטורים

טרנזיסטור הוא אמצעי טכנולוגי חכם. נלמד מעט על עקרון פעולתו.

נתבונן באחד מסוגי הטרנזיסטורים מגרמניום או מצורן, שהוכנסו בו סיגים תורמים וסיגים קולטים. בעקבות פיזור הסיגים נוצרת שכבה דקה מאוד (בסדר גודל של כמה מיקרונים) של מוליך למחצה מסוג n בין שתי שכבות של מוליך למחצה מסוג p (ציור 235). שכבה זו מכונה **בסיס**.

זרם חשמל בסוגי חוץ שונים



ציור 235

בגביש נוצרים שני צומתי n-p, ומגמות המעבר הישיר בהם מנוגדות. שלוש יציאות מהאזורים בעלי מוליכות מסוג שונה מאפשרות לחבר את הטרנזיסטור למעגל, המתואר בציור 235. עבור החיבור הנתון מהווה הצומת n-p השמאלי **מעבר ישיר**, והוא מפריד בין הבסיס לבין האזור בעל מוליכות מסוג p, המכונה **פולט**. אילו לא היה קיים הצומת n-p הימני, היה קיים בין הפולט

לבין הבסיס במעגל זרם, התלוי במתח המקורות (הסוללה B1 ומקור המתח המשתנה) ובהתנגדות המעגל (הכוללת את ההתנגדות הזעירה של המעבר הישיר שבין הפולט לבין הבסיס).

הסוללה B2 מחוברת באופן שהצומת n-p הימני במעגל (ראו ציור 235) מהווה **מעבר הפוך**, והוא מפריד בין הבסיס לבין האזור הימני בעל מוליכות מסוג p, המכונה **קולט**. אילו לא היה קיים הצומת n-p השמאלי, היתה עוצמת הזרם במעגל של הקולט קרובה לאפס, מכיוון שהתנגדות המעבר ההפוך גדולה מאוד. כאשר זרם זרם דרך הצומת n-p השמאלי, זרם זרם גם במעגל של הקולט, אך בעוצמה קטנה רק במעט מעוצמת הזרם בפולט.<sup>1</sup>

התהליך הוא כדלקמן: כאשר נוצר מתח בין הפולט לבין הבסיס, חודרים החורים – הנשאים העיקריים במוליך למחצה מסוג p – לתוך הבסיס, כשהם מתפקדים כנשאים משניים. מכיוון שעובי הבסיס קטן מאוד ומספר הנשאים העיקריים (האלקטרונים) בו אינו גדול, החורים שחדרו בו כמעט שאינם מתאחדים עם האלקטרונים של הבסיס, והם מגיעים לקולט באמצעות דיפוזיה. הצומת n-p הימני סגור לנשאי המטען העיקריים – האלקטרונים, אולם לא סגור למעבר החורים.

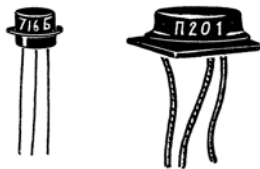
<sup>1</sup> אם המתח על הפולט שלילי, יהיה הצומת n-p השמאלי בעל מעבר הפוך, ועוצמת הזרם במעגל של הפולט ובמעגל של הקולט תהיינה קרובות לאפס.

בקולט נסחפים החורים על-ידי השדה החשמלי וסוגרים את המעגל. עוצמת הזרם, המתפצל למעגל של הפולט מהבסיס, קטנה מאוד, מכיוון ששטח החתך של הבסיס במישור האופקי (ראו ציור 235) קטן בהרבה מהחתך במישור האנכי.

למעשה שווה עוצמת הזרם בקולט לעוצמת הזרם בפולט, והיא משתנה עם זרם הפולט. התנגדות הנגד R משפיעה מעט על עוצמת זרם הקולט, ולכן ניתן להגדילה. על-ידי בקרת זרם הפולט באמצעות מקור המתח המשתנה, המחובר למעגל של הפולט, נקבל שינוי מתח מתאים על הנגד R.

כאשר התנגדות הנגד גדולה, עשוי שינוי המתח עליו להיות גדול עשרות אלפי מונים ממתח האות במעגל הפולט. לכן אפשר לקבל על הנגד R אותות חשמליים, שעוצמתם גדולה בהרבה מעוצמת האות הנכנס למעגל הפולט.

#### שימוש בטרנזיסטורים



ציור 236

לטרנזיסטורים (ציור 236) שימושים רבים ומגוונים בטכנולוגיה בת-זמננו. הם החליפו שפופרות אלקטרוניות במעגלי חשמל רבים ובמכשירים שימושיים במדע, בתעשייה ובבית. מקלטי רדיו זעירים, המכילים רכיבים אלה, מכונים בחיי היומיום **טרנזיסטורים**. יתרונות הטרנזיסטורים (כמו גם של דיודות ממוליכים למחצה) לעומת שפופרות אלקטרוניות הם, קודם לכול, העדר קתודה לוהטת, הצורכת הספק משמעותי והדורשת שהות זמן לחימומה. בנוסף, רכיבים אלה קטנים וקלים עשרות ומאות מונים משפופרות אלקטרוניות ופועלים במתחים נמוכים יותר.

חסרונותיהם של הטרנזיסטורים דומים לאלה של הדיודות: הם רגישים מאוד לעליית הטמפרטורה, לעוצמות יתר של זרמים ולקרינה חודרת.

בתכונות של צומת p-n במוליכים למחצה משתמשים להגברה ולייצור של תנודות חשמליות.

זרם חשמל בסוגי חוץ שונים



1. מדוע חייב בסיס הטרנזיסטור להיות דק?
2. כיצד נחבר למעגל את הטרנזיסטור, שהבסיס בו עשוי ממוליך למחצה מסוג p, והקולט והפולט הם מוליכים למחצה מסוג n?
3. מדוע שווה עוצמת הזרם בקולט בערך לעוצמת הזרם בפולט?

### §120 זרם חשמל בריק דיודה

עד לגילוי התכונות הייחודיות של המוליכים למחצה השתמשו ברדיוטכנולוגיה בשפופרות אלקטרוניות בלבד. בשפופרות אלה, כמו גם בשפופרות טלוויזיה – בהן רב השימוש עתה (עדיין) – נעים האלקטרונים בריק. כיצד נוצרים זרמי אלקטרונים בריק? אילו תכונות יש להם?

כאשר שואבים גז ממכל, ניתן להגיע לריכוז כה דליל, שהמולקולות מצליחות לנוע מדופן לדופן ללא התנגשויות עם המולקולות האחרות. מצב זה של גז במכל מכונה **ריק** (אף שנותרות בו מעט מולקולות).

את המוליכות החשמלית ב**ריק** ניתן לקיים בהכנסת המקור לחלקיקים הטעונים לתוך מכל **שריק** בו.

#### פליטה תרמואלקטרית

פעולת מקור החלקיקים הטעונים מבוססת על תכונת הגוף, המחומם לטמפרטורה גבוהה, לפלוט אלקטרונים. תהליך זה מכונה **פליטה תרמואלקטרית**. את התהליך הזה אפשר לתאר כ"התאדות" האלקטרונים ממשטח המתכת. במוצקים רבים מתחילה פליטה תרמואלקטרית בטמפרטורות, שבהן היתוך החומר עצמו טרם החל. בחומרים אלה משתמשים לייצור הקתודות פולטות האלקטרונים.

#### מוליכות חד-כיוונית

בתהליך הפליטה התרמואלקטרית פולטת אלקטרודה מתכתית מחוממת אלקטרונים ללא הרף, ואלה יוצרים סביב האלקטרודה **ענן אלקטרוני**. כתוצאה מנטישת האלקטרונים נטענת האלקטרודה חיובית, ובהשפעת השדה החשמלי שהיא יוצרת נמשכים חלק מהאלקטרונים וחוזרים מהענן לאלקטרודה.

זרם חשמל בסוגי חוץ שונים

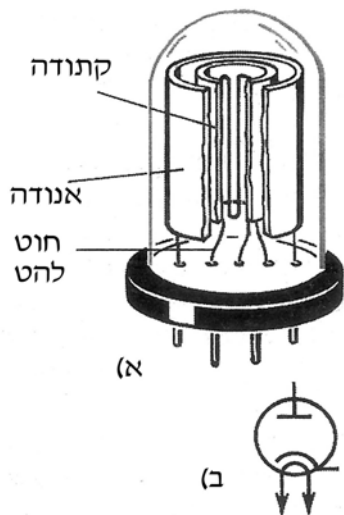
במצב שיווי-משקל שווה מספר האלקטרונים, העוזבים את האלקטרודה ביחידת זמן, למספר האלקטרונים, שחזרו לאלקטרודה באותו פרק זמן. ככל שטמפרטורת המתכת גבוהה יותר, כן גדולה צפיפותו של הענן האלקטרוני.

הפרש הפוטנציאלים בין האלקטרודה האחת, החמה, לבין האחרת, הקרה, גורם למוליכות חד-מגמתית של זרם חשמל ביניהן.

כאשר מחברים את האלקטרודות למקור זרם, נוצר ביניהן שדה חשמלי. אם הקוטב החיובי של מקור הזרם מחובר לאלקטרודה הקרה (אנודה), והקוטב השלילי – לאלקטרודה החמה (קתודה), מכוונת מגמת השדה החשמלי לאלקטרודה החמה. בהשפעת שדה זה עוזבים חלק מהאלקטרונים את ענן האלקטרונים ונעים אל האלקטרודה הקרה. המעגל החשמלי נסגר, ומתייצב זרם חשמל. בחיבור ההפוך של המקור מגמת השדה היא מהאלקטרודה החמה אל הקרה. השדה החשמלי דוחה את האלקטרונים של הענן בחזרה לאלקטרודה החמה, ומצב המעגל פתוח.

#### דיודה

במוליכות חד-מגמתית משתמשים במכשירים אלקטרוניים בעלי שתי אלקטרודות: **דיודות הריק**.



ציור 237

המבנה של דיודת הריק (שפופרת אלקטרונית) הוא זה: בתוך שפופרת העשויה מזכוכית או מקרמיקה מתכתית, שריק חלקי בה עד ללחץ של  $10^{-6}$ – $10^{-7}$  mm Hg, נמצאות שתי אלקטרודות (ציור 237א). אחת מהן, הקתודה, עשויה כמעטפת גליל מתכתי אנכי, המצופה בשכבת אוקסידים של עפרות נדירות, כמו בריום, סטרונציום או סידן. קתודה כזאת מכונה **קתודה אוקסידית**.

בתוך הקתודה מצוי מוליך מבודד המחומם על-ידי זרם חילופין. במהלך החימום פולט משטח הקתודה האוקסידית הרבה יותר

אלקטרונים מאשר קתודה ממתכת טהורה. הקתודה המחוממת פולטת

זרם חשמל בסוגי חוץ שונים

אלקטרוניים, ואלה מגיעים לאנודה, אם יש בה פוטנציאל גבוה יותר מזה של הקתודה.

האנודה של השפופרת עשויה כמעטפת של גליל מעגלי או אובלי בעל ציר משותף עם הקתודה. התיאור הסכמתי של הדיודה מובא בציר 237ב.

לדיודות הריק נמצא שימוש רב במיישרי זרם חילופין, לצד הדיודות המבוססות על מוליכים למחצה.

לצורך יצירת הזרם בריק דרוש מקור מיוחד של חלקיקים טעונים. פעולת מקור זה מבוססת על פליטה תרמואלקטרית. מכשיר בעל שתי אלקטרודות הפועל בריק מכונה **דיודה**. לדיודה מוליכות חשמלית חד-כיוונית. בתכונה זו של הדיודה משתמשים ליישור זרם חילופין.

?

1. מדוע יוצרים ריק בשפופרת אלקטרונית?

2. כיצד בנויה דיודת ריק?

### §121 אלומות של אלקטרוניים שפופרת האלקטרוניים

אם ננקב נקב באנודה של השפופרת האלקטרונית, יעבור חלק מהאלקטרוניים המואצים על-ידי השדה החשמלי דרך הנקב. כך תיווצר אלומת אלקטרוניים. אפשר לבקר את כמות האלקטרוניים באלומה על-ידי שינוי הפוטנציאל של אלקטרודה נוספת, שנציב בין האנודה לבין הקתודה. החלקיקים המהירים של אלומת האלקטרוניים גורמים לתופעות שונות לאחר פגיעה בחומרים שונים.

#### התכונות של אלומות האלקטרוניים ושימושיהן

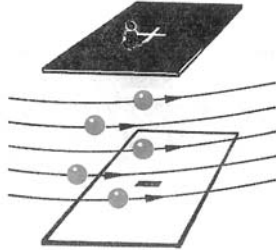
כאשר אלומת אלקטרוניים פוגעת בגופים, היא גורמת להתחממותם. בטכנולוגיה בת-ימינו משתמשים בתכונה זאת להתכה אלקטרונית בריק של מתכות טהורות.

במהלך הבלימה של אלקטרוניים מהירים, הפוגעים בחומר, נוצרת קרינת רנטגן. בתכונה זו משתמשים בשפופרות רנטגן.

חומרים שונים (זכוכית, אבץ גופריתי וקדמיום) פולטים אור כאשר הם מופצצים על-ידי אלקטרוניים; חומרים אלה מכונים **זרחניים**. בזמן אחרון פיתחו

זרם חשמל בסוגי חוץ שונים

חומרים זרחניים, שמתמירים לאנרגיית אור עד כדי 25% מאנרגיית האלומה האלקטרונית הפוגעת בהם.



ציור 238

אלומות האלקטרוניים מוסטות על-ידי שדה חשמלי. לדוגמה: במעבר בין לוחות הקבל מוסטים האלקטרוניים מהלוח השלילי אל הלוח החיובי (ציור 238).

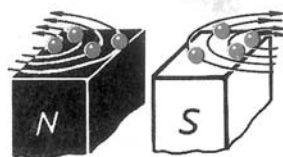
אלומת האלקטרוניים מוסטת גם בשדה מגנטי.

אלומת אלקטרוניים מעל לקוטב הצפוני של

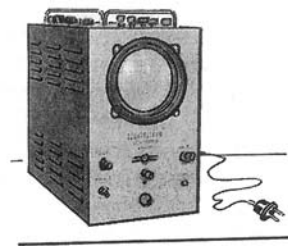
מגנט מוסטת שמאלה, ומעל לקוטב הדרומי – ימינה (ציור 239).

זרמי האלקטרוניים, המגיעים מהשמש לשדה המגנטי של כדור הארץ, גורמים לזריחת הגזים בשכבות עליונות של האטמוספירה באזורים שליד הקטבים (הזוהר הצפוני).

השליטה באלומת אלקטרוניים באמצעות שדה החשמלי או שדה מגנטי, והזריחה של המסך המצופה בחומר זרחני, מיושמים בשפופרת אלקטרוניים.



ציור 239



ציור 240

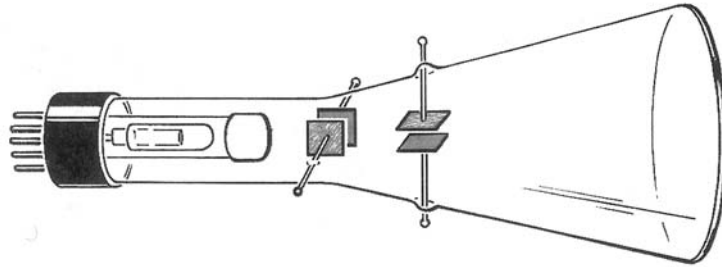
### שפופרת אלקטרוניים

שפופרת אלקטרוניים היא הרכיב המרכזי בטלוויזיה ובאוסצילוגרף<sup>1</sup> – המכשיר לחקירת תהליכים משתנים ומהירים במעגלים חשמליים (ציור 240).

מבנה שפופרת האלקטרוניים מוצג בציור 241. השפופרת היא מכל מרוקן, ואחת מדופנותיו משמשת כמסך. בקצה הצר של השפופרת מצוי מקור האלקטרוניים המהירים – **התוח האלקטרוני** (ציור 242) – המורכב מקתודה, אלקטרודה

<sup>1</sup> מהמילים היווניות "אוסצילון" – מתנדנד, ו"גרפון" – כותב.

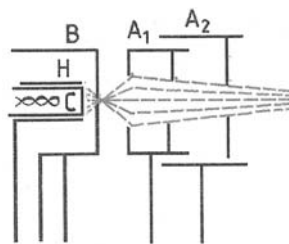
ממקדת ואנודה (לפעמים כמה אנודות ממוקמות זו לאחר זו). האלקטרונים נפליטים משכבת אוקסיד חמה בקצה הקתודה הגלילית C, העטופה במסך המספק בידוד תרמי H. האלקטרונים עוברים דרך נקב שבאלקטרודה הגלילית B (השולטת על כמות האלקטרונים באלומה). כל אנודה,  $A_1$  ו-  $A_2$  (ראו ציור 242), מורכבת מדיסקים המכילים פתחים קטנים, והדיסקים מורכבים בתוך גלילי מתכת. בין האנודה הראשונה לבין הקתודה מופעל הפרש פוטנציאלים של מאות, ואפילו אלפי וולט.



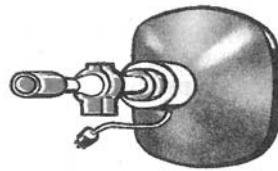
ציור 241

השדה החשמלי החזק מאיץ את האלקטרונים ומקנה להם מהירות גבוהה. את מרכיבי האצת האלקטרונים מתכננים כך, שהאלומה תתמקד בנקודה על המסך הזורח.

בדרך למסך עוברת האלומה בין שני זוגות לוחות מכוננים, זה לאחר זה, הדומים ללוחות הקבל (ציור 241). בהעדר שדה בין הלוחות, אין האלומה סוטה ממסלולה, ונקודה זוהרת תופיע במרכז המסך. כאשר מפעילים מתח בין הלוחות האנכיים, מוסטת האלומה במישור האופקי; ובהפעלת מתח בין הלוחות האופקיים מוסטת האלומה במישור האנכי.



ציור 242



ציור 243

שימוש בו-זמני בשני זוגות הלוחות מאפשר להניע נקודה זוהרת על המסך בכל כיוון. מכיוון שמסת האלקטרונים קטנה מאוד, הם מגיבים כמעט באופן מיידי (בזמן קצר ביותר) לכל שינוי בהפרש הפוטנציאלים שבין הלוחות. בשפופרת האלקטרונים שבטלוויזיה מתבצעת השליטה באלומה, הנוצרת על-ידי תותח האלקטרונים, באמצעות שדה מגנטי. את השדה הזה יוצרים סלילים הנמצאים בצוואר השפופרת (ציור 243).

שימוש נפוץ אחר לשפופרת האלקטרונים הוא בצג המחשב (Display) – מכשיר המחובר למחשב והמאפשר להציג מידע שמספק המחשב: טקסט, תמונות, סרטים והדמיות של עצמים מדומים שנבנו במחשב.

בשפופרות האלקטרונים נוצרות אלומות אלקטרונים דקות, והן נשלטות באמצעות השדה החשמלי והשדה המגנטי. בשפופרות מסוג זה משתמשים באוסצילוגרפים, במקלטי טלוויזיה ובצגי מחשבים.



1. כיצד מתבצעת השליטה על אלומת האלקטרונים?
2. כיצד בנויה שפופרת האלקטרונים?

## §122 זרם חשמל בנוזלים

כמוצקים עשויים נוזלים להיות דיאלקטריים או מוליכים או מוליכים למחצה. דוגמאות: בעלי התכונות הדיאלקטריות הם המים המזוקקים; המוליכים הם תמיסות ותרובות של אלקטרוליטים: חומצות, מלחים ובסיסים; המוליכים למחצה הנוזליים הם סלן מותך, גופריתיים מותכים.

### הפירוק האלקטרוליטי

במהלך התמוססות האלקטרוליטים במים מתרחש פירוק מולקולות האלקטרוליטים ליונים על-ידי המולקולות הקוטביות של המים: קוטבי מולקולות המים נצמדים לקטבים מנוגדי הסימן של האלקטרוליט ו"קורעים" אותו למרכיביו, הנושאים מטענים המנוגדים בסימנם – הם היונים. תהליך זה מכונה **פירוק אלקטרוליטי**.

זרם חשמל בסוגי תווך שונים

**דרגת הפירוק** – החלק היחסי של המולקולות שהתפרקו בתמיסה ליונים – תלויה בטמפרטורה, בריכוז התמיסה ובתכונות החשמליות של הממס. עם עליית הטמפרטורה הולכת וגדלה דרגת הפירוק, ובהתאם גדל הריכוז של היונים הטעונים חיובית ושלילית.

יונים בעלי מטענים מנוגדים עשויים להתאחד מחדש למולקולות נייטרליות, כלומר לעבור **איחוד מחדש**. בתנאים שאינם משתנים ישרור בתמיסה מצב שיווי-משקל דינמי: מספר המולקולות המתפרקות ליונים ביחידת זמן שווה למספר זוגות היונים שהתאחדו מחדש למולקולות נייטרליות באותו פרק זמן.

#### **מוליכות יונית**

נשאי המטענים בתמיסות מימיות של אלקטרוליטים הם יונים חיוביים ויונים שליליים.

אם נחבר לשני צדי כלי, המכיל תמיסה אלקטרוליטית, קצוות של מעגל חשמלי, ינועו היונים השליליים לאלקטרודה החיובית – לאנודה, והיונים החיוביים ינועו לאלקטרודה השלילית – לקתודה, ויתייצב זרם חשמל. מכיוון שהעברת המטענים בתמיסות מימיות של אלקטרוליטים מומסים מתבצעת על-ידי יונים, מכונה הולכה מסוג זה **הולכה יונית**.

#### **אלקטרוליזה**

במהלך ההולכה היונית מתרחשת העברת חומר: על האלקטרודות מצטברים החומרים, שמהם מורכב האלקטרוליט. לפני האנודה מוסרים היונים השליליים את האלקטרונים המיותרים (בכימיה מכונה תהליך זה **חמצון**), ועל פני הקתודה קולטים היונים החיוביים את האלקטרונים החסרים (תהליך **חיזור**). תהליך הופעת החומר על האלקטרודה, המתרחש כתולדה של תגובות חמצון-חיזור, מכונה **אלקטרוליזה**.

#### **שימושי האלקטרוליזה**

לאלקטרוליזה יישום נרחב בתעשייה למטרות שונות: באמצעות האלקטרוליזה מצפים משטח של מתכת בשכבה דקה של מתכת אחרת (ניקל, כרום, נחושת). זהו ציפוי דק ויציב, המגן על פני המשטח מחלודה.

תעשיית הדפוס עשתה שימוש בציפויי אִמְהוֹת (מטריצות) בשכבת מתכת ויצירת

**זרם חשמל בסוגי תווך שונים**

לוח להדפסה. שיטה זאת מאפשרת לשחזר את הדפסת השקע במספר העותקים הרצוי. בעבר היה מספר העותקים במהדורה תלוי במספר ההדפסות שהיה אפשר לעשות מלוח אחד (כי בהדפסה הלוח נשחק), אבל השימוש במטריצות אפשר להגדיל את המהדורה בעותקים רבים.

תהליך הייצור של הציפויים המופרדים, המכונה **גלונופלסטיקה**, פותח על-ידי המדען הרוסי **ב' יעקובי** (1801 – 1874). הוא השתמש בשיטה זאת לייצור גופים חלולים לכנסיית "איסקיי" בסנט-פטרבורג.

**באמצעות אלקטרוליזה מבצעים ניקוי מתכות מסיגים**: מתיכים עפרת נחושת וממזקים אותה ללוחות, ומכניסים את הלוחות כאלקטרודות לאמבט אלקטרוליטי. במהלך תהליך האלקטרוליזה מתמוססת הנחושת, המשמשת כאנודה; הסיגים, הכוללים מתכות יקרות ונדירות, צונחים לקרקעית הכלי; ועל הקתודה מצטברת נחושת טהורה.

בעזרת האלקטרוליזה מייצרים אלומיניום המכיל סיגים. שיטה זו הוזילה מאוד את ייצור האלומיניום, וכך לצד הברזל היה למתכת נפוצה ביותר בתעשייה ובבית.

בעקבות פירוקן של מולקולות נייטרליות ליונים בתמיסות של אלקטרוליטים נוצרים מטעני חשמל חופשיים. תנועת היונים בשדה מלווה בהעברת חומר. תהליך זה מכונה **אלקטרוליזה**, והוא נמצא בשימוש רחב בתעשייה.

?

1. מהו פירוק אלקטרוליטי?
2. מדוע מתלווה לזרם, העובר בתמיסה אלקטרוליטית, העברת חומר – בעוד שלזרם הזרם במתכת לא מתלווה העברת חומר?
3. מה משותף ומה שונה בתהליכי ההולכה העצמית במוליכים למחצה ובתהליכי הולכה בתמיסות אלקטרוליטיות?

זרם חשמל בסוגי חוץ שונים

## §123 חוקי האלקטרוליזה

במהלך האלקטרוליזה מצטבר חומר על האלקטרודות. במה תלויה מסת החומר המצטברת? את התשובה מספק חוק האלקטרוליזה.

מסת החומר שהצטברה שווה למכפלת המסה של יון אחד  $m_{0i}$  במספר היונים  $N_i$  שהגיעו לאלקטרודה בזמן  $\Delta t$ :

$$(16.3) \quad m = m_{0i} N_i$$

בהתאם לנוסחה (8.4) שווה מסת יון:

$$(16.4) \quad m_{0i} = \frac{M}{N_A}$$

כאשר:  $M$  – מסה מולרית (או אטומית) של החומר;  $N$  – מספר אבוגדרו, כלומר מספר היונים במול אחד.

מספר היונים שהגיעו לאלקטרודה שווה:

$$(16.5) \quad N_i = \frac{\Delta q}{q_{0i}}$$

כאשר:  $\Delta q = I\Delta t$  – המטען שעבר דרך אלקטרוליט בזמן  $\Delta t$ ;  $q_{0i}$  – מטען היון, המוגדר על-ידי הערכיות  $n$  של האטום:  $q_{0i} = ne$  (הוא המטען הבסיסי).

במהלך פירוק המולקולות, המורכבות מאטומים בעלי ערכיות 1 ( $n = 1$ ), נוצרים יונים בעלי מטען יחיד. לדוגמה: פירוק המולקולה  $KBr$  גורם להיווצרות היונים  $K^+$  ו- $Br^-$ . פירוק המולקולות של נחושת גופריתית גורמת להופעת יונים שמטענם 2,  $Cu^{2+}$  ו- $SO_4^{2-}$ , מכיוון שהאטומים של נחושת בתרכובת הזאת הם בעלי ערכיות שערכה 2 ( $n = 2$ ). נציב בנוסחה (16.3) את הביטויים (16.4) ו- (16.5), כאשר:  $\Delta q = I\Delta t$  ו-  $q_{0i} = ne$ , ונקבל:

$$(16.6) \quad m = \frac{M}{neN_A} I\Delta t$$

**חוק פאראדי**

נסמן באמצעות  $k$  את מקדם הפרופורציונליות בין מסת החומר  $m$  לבין המטען

$\Delta q = I\Delta t$ :

$$(16.7) \quad k = \frac{1}{eN_A} \cdot \frac{M}{n}$$

זרם חשמל בנוזלים

המקדם  $k$  תלוי במהות החומר (הערכים  $M$  ו- $n$ ), ואז:

$$m = kI\Delta t \quad (16.8)$$

בתהליך האלקטרוליזה פרופורציונלית מסת החומר, המצטבר באלקטרודה

בפרק זמן  $\Delta t$ , למכפלת עוצמת הזרם בפרק הזמן.

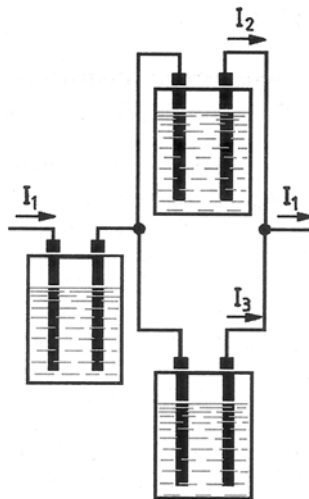
יחס זה התגלה באופן ניסויי על-ידי פאראדי, והוא נושא שמו: חוק האלקטרוליזה של פאראדי.

מהנוסחה (16.8) לומדים, שהמקדם  $k$  שווה למסת החומר המצטבר על האלקטרודה, כשעובר דרך התמיסה מטען ששיעורו  $1C$ . הגודל  $k$  מכונה המקדם האלקטרוכימי של החומר הנתון, ויחידותיו הן קילוגרם לקולון ( $kg/C$ ).

למקדם האלקטרוכימי משמעות פיזיקלית פשוטה מאוד: מכיוון ש- $m_{0i} = \frac{M}{N_A}$

ו- $en = q_{0i}$ , אזי בהתאם ל- (16.7) מקבלים:  $k = \frac{m_{0i}}{q_{0i}}$ , כלומר, יחס מסת היום למטענו.

על-ידי מדידת הערכים של  $m$  ו- $\Delta q$  ניתן למצוא את המקדמים האלקטרוכימיים של חומרים שונים.



ציור 244

ניתן להוכיח את חוק פאראדי באופן ניסויי: נחבר מערך, המתואר בציור 244. בכל שלושת הכלים מצוי אותו סוג של אלקטרוליט, אולם הזרמים שעוברים דרכם שונים. נסמן את עוצמות הזרם באמצעות  $I_1, I_2, I_3$ . ברור ש:  $I_1 = I_2 + I_3$ . נמדוד את מסות החומר  $m_1, m_2, m_3$  שהופיעו בכלים שונים, וניווכח שהן פרופורציונליות לעוצמות  $I_1, I_2, I_3$ , בהתאמה.

#### מדידת מטען האלקטרון

אפשר להשתמש בנוסחה (16.6) עבור מסת החומר המצטבר על האלקטרודה, כדי למדוד מטען של אלקטרון. מהנוסחה נובע שגודל מטען האלקטרון שווה:

$$(16.9) \quad e = \frac{M}{mnN_A} I \Delta t$$

נשקול את מסת החומר  $m$ , המצטברת על האלקטרודה לאחר העברת מטען  $I \Delta t$ , ואם ידועים המסה המולרית  $M$ , ערכיות האטומים  $n$  ומספר אבוגדרו  $N_A$ , ניתן למצוא את ערך המטען של אלקטרון. תוצאת המדידות היא:

$$e = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

בדרך זו חושב לראשונה בשנת 1874 ערכו של המטען האלמנטרי.

מכפלת עוצמת הזרם בזמן מגדירה את מסת החומר המופיע באלקטרוליזה. חוק האלקטרוליזה מאפשר למצוא את ערך המטען החשמלי האלמנטרי.

?

1. מהו חוק האלקטרוליזה של פאראדי?
2. מדוע היחס שבין מסת החומר, המצטבר על האלקטרודה באלקטרוליזה, לבין מסת היון שווה ליחס שבין המטען שעובר בתמיסה לבין מטענו של היון?

#### §124 זרם חשמל בגזים

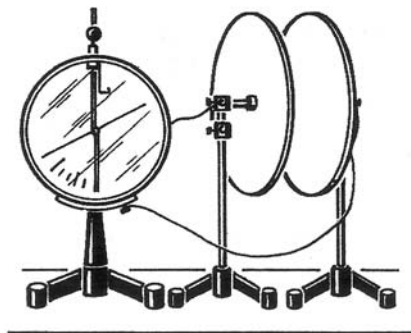
הכרנו את מנגנוני ההולכה במוצקים ובנוזלים וגם את הזרם בריק. נותר לנו להכיר את זרם החשמל בגזים.

#### התפרקות חשמלית בגז

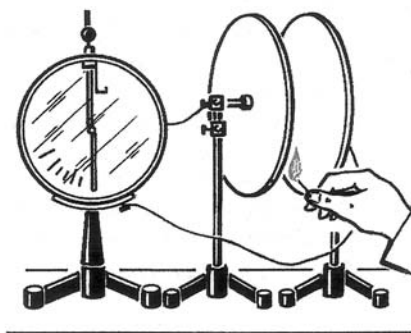
נחבר לאלקטרומטר דסקות של קבל לוחות מישורי ונטען אותו (ציור 245). בטמפרטורת החדר, כאשר האוויר יבש דיו, אין הקבל מתפרק באופן הנראה לעין. זו עדות לכך שהזרם, הנגרם על-ידי הפרש הפוטנציאלים בין הדסקות, קטן מאוד. במצב זה קטנה המוליכות החשמלית של האוויר בטמפרטורת החדר, והאוויר משמש כתווך דיאלקטרי.

נדליק כעת גפרור ונחמם את האוויר שבין הדסקות (ציור 246). מחוג האלקטרומטר ינוע מהר לכיוון האפס, כלומר הקבל מתפרק. מסתבר מהניסוי שאוויר חם מוליך זרם חשמל.

זרם חשמל בגזים



ציור 245



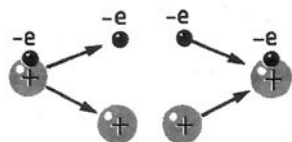
ציור 246

**תהליך העברת הזרם דרך גז מכונה התפרקות בגז.**

**יינון גזים**

ראינו כבר שבטמפרטורת החדר האוויר הוא מוליך גרוע מאוד, אבל עם העלאת הטמפרטורה מוליכות האוויר גדלה. אפשר לגרום להגברת המוליכות גם בשיטות אחרות – לדוגמה: על-ידי הקרנה תווך האוויר באור אולטרה-סגול, בקרינת רנטגן, בקרינה רדיואקטיבית ועוד.

בתנאים רגילים מכילים הגזים כמעט אך ורק אטומים או מולקולות נייטרליים, ולכן הם דיאלקטריים. בעקבות החימום או ההקרנה עוברים חלק מהאטומים תהליך של יינון: התפרקות ליונים חיוביים ולאלקטרונים (ציור 247). בגז יכולים להיווצר גם יונים שליליים, המופיעים עקב היצמדות האלקטרונים לאטומים נייטרליים.



ציור 247

ציור 248

את יינון הגזים במהלך החימום ניתן להסביר כך: עקב החימום נעות המולקולות מהר יותר, וחלקן נעות כה מהר, שהן מתפרקות במהלך ההתנגשויות ונהיות ליונים.

מספר היונים גדל עם החימום ועליית הטמפרטורה בעקבותיו.

**מוליכות הגזים**

מנגנון המוליכות של הגזים דומה לזה של תמיסות האלקטרוליטים. ההבדל הוא בכך: המטען השלילי אינו מועבר על-ידי יונים שליליים, כדרך העברתו בתמיסות

מימיות של אלקטרוליטים, אלא על-ידי האלקטרונים.

תכונת המוליכות בגזים יסודה ביונים, בדומה לתכונת המוליכות היונית של תמיסות האלקטרוליטים; אולם קיים הבדל משמעותי: בתמיסות האלקטרוליטים נוצרים היונים בעקבות היחלשות הקשרים התוך-מולקולריים בהשפעת המולקולות של הממס (מולקולות מים) – ואילו בגזים נוצרים היונים בחימום או בהשפעת מקורות יינון חיצוניים.

#### **איחוד מחדש**

אם יחדל המיינן לפעול, ניתן יהיה להבחין שהאלקטרומטר הטעון ימשיך להעיד על הישארות המטען, משום שלאחר פעולת המיינן מפסיק הגז להוליך חשמל. הזרם נפסק לאחר שכל היונים והאלקטרונים מגיעים לאלקטרודות. מלבד זאת, במהלך ההתקרבות בין אלקטרון ליון הטעון חיובית הם יכולים ליצור מחדש אטום נייטרלי. אפשר לראות זאת באופן סכמתי בציור 248. תהליך כזה מכונה **איחוד מחדש של חלקיקים טעונים**.

בהעדר שדה חיצוני נעלמים חלקיקים טעונים עקב האיחוד מחדש, והגז חוזר להיות דיאלקטרי. אם פעולת המיינן אינה משתנה, מתייצב שיווי-משקל דינמי, ומספר הזוגות של חלקיקים טעונים הנוצרים שווה למספר הממוצע של הזוגות הנעלמים לאחר האיחוד מחדש.

בטמפרטורת החדר הגזים הם דיאלקטריים. חימום הגז או הקרנתו על-ידי אור אולטרה-סגול, קרינת רנטגן או קרינה אחרת גורמים ליינון האטומים או המולקולות של הגז, והוא נהיה מוליך.

**?**

1. מה ההבדל בין פירוק אלקטרוליטים לבין יינון של גזים?
2. מהו איחוד מחדש?
3. מדוע חוזר הגז להיות דיאלקטרי לאחר הפסקת פעולתו של הגורם המיינן?

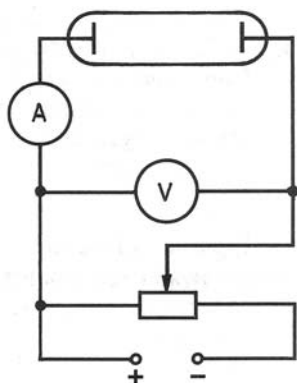
**זרם חשמל בגזים**

## §125 התפרקות עצמאית והתפרקות שאינה עצמאית

ההתפרקות בגז עשויה להתרחש גם ללא מיינן חיזוני, כלומר התפרקות יכולה לתמוך בעצמה. כיצד אפשרי הדבר?

### התפרקות שאינה עצמאית

כדי לחקור את תופעת ההתפרקות בגז נוח להשתמש בשפופרת זכוכית בעלת שתי אלקטרודות (ציור 249).



ציור 249

בעזרת מיינן כלשהו נוצר בגז מספר מסוים של זוגות חלקיקים טעונים: יונים חיוביים ואלקטרונים.

כאשר הפרש הפוטנציאלים בין האלקטרודות אינו גדול, נעים היונים החיוביים אל האלקטרודה השלילית, והאלקטרונים נעים אל האלקטרודה החיובית. אם כן, בשפופרת נוצר זרם חשמל, כלומר מתרחשת התפרקות חשמלית.

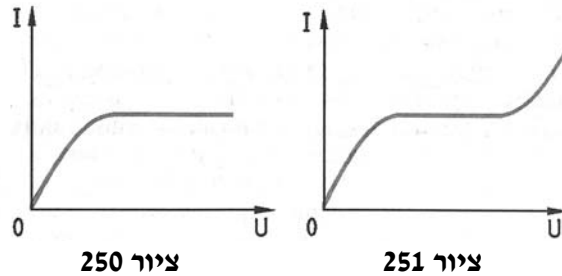
לא כל היונים הנוצרים מגיעים לאלקטרודות; חלק מהם מתאחד עם האלקטרונים ויוצר מולקולות נייטרליות. ככל שגדול הפרש הפוטנציאלים בין האלקטרודות של השפופרת, כך גדל גם מספר החלקיקים הטעונים המגיעים לאלקטרודות, וכך גוברת עוצמת הזרם במעגל. מגיע רגע שבו כל החלקיקים הטעונים, הנוצרים בגז ביחידת הזמן, מגיעים בפרק זמן זה לאלקטרודות. מרגע זה מפסיקה עוצמת הזרם לגדול (ציור 250); זה מצב הרוויה. אם נפסיק את פעולת המיינן, תיפסק גם ההתפרקות, מכיוון שאין מקורות אחרים ליונים. מסיבה זו מכונה התפרקות זו **התפרקות שאינה עצמאית**.

### התפרקות עצמאית

כיצד תתפתח ההתפרקות בגז, אם נמשיך ונגביר את הפרש הפוטנציאלים בין האלקטרודות? הגיוני לחשוב, שעקב תפוקת המטענים בגין המיינן תישאר עוצמת הזרם ללא שינוי בעת הגדלה נוספת של הפרש הפוטנציאלים; אולם הניסויים מראים שכאשר ממשיכים ומעלים את הפרש הפוטנציאלים מעל לערך כלשהו אף

זרם חשמל בגזים

לאחר מצב הרוויה, גדלה עוד יותר עוצמת הזרם בגזים (ציור 251).



עובדה זו מעידה על הופעת יונים נוספים לאלה שנוצרו על-ידי המיינן החיצוני. עוצמת הזרם עשויה לגדול מאות ואלפי מונים, ומספר היונים הנוצרים במהלך ההתפרקות עשוי להיות כה גדול, שלא יהיה עוד צורך במיינן חיצוני להמשך קיום ההתפרקות: אם נפסיק את פעולת המיינן החיצוני, ההתפרקות לא תיפסק. מכיוון שההתפרקות אינה זקוקה עוד למיינן חיצוני, היא מכונה **התפרקות עצמאית**.

#### יינון באמצעות הפצצה אלקטרונית

מהן הסיבות לעלייה חדה בעוצמת הזרם בגז במתחים גבוהים? נסתכל בזוג כלשהו של חלקיקים טעונים (יון חיובי ואלקטרון), שנוצרו הודות לפעולת המיינן החיצוני. האלקטרון החופשי שהופיע באופן זה נע אל האלקטרודה החיובית – האנודה, והיון החיובי – אל הקתודה. בדרכו פוגש האלקטרון את היונים ואת האטומים הנייטרליים. בקטע שבין שתי התנגשויות עוקבות גדלה אנרגיית האלקטרון לפי מידת השקעת העבודה של כוחות השדה החשמלי. ככל שגדול הפרש הפוטנציאלים בין האלקטרודות, כך גדולה עוצמת השדה החשמלי.

האנרגיה הקינטית של האלקטרון לפני ההתנגשות פרופורציונלית לעוצמת השדה ולמרחק  $l$  של מהלכו החופשי של האלקטרון (המרחק בין שתי התנגשויות עוקבות):

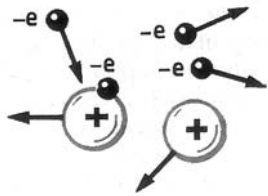
$$(16.10) \quad \frac{mv^2}{2} = eEl$$

אם האנרגיה הקינטית של האלקטרון גדולה מהעבודה  $A_i$ , שיש לבצע כדי ליינן אטום נייטרלי, כלומר, אם:

$$\frac{mv^2}{2} \geq A_i$$

אזי במהלך ההתנגשות של האלקטרון והאטום מתרחש יינון (ציור 252). אם כך,

במקום אלקטרון חופשי אחד יהיו עתה שניים (זה הפוגע באטום, והאחר המשתחרר ממנו).



ציור 252

בתוך מקבלים האלקטרונים האלה אנרגיה בשדה ומייננים את האטומים שהם פוגשים, וכך הלאה, וכך גדל באופן חד מספר החלקיקים הטעונים. התהליך המתואר מכונה **יינון באמצעות הפצצה של אלקטרונים**; אולם יינון זה בלבד אינו יכול להבטיח את קיומה של התפרקות עצמאית

ממושכת: הרי כל האלקטרונים הנוצרים באופן זה נעים לכיוון האנודה, וכאשר הם מגיעים אליה הם "יוצאים מהמשחק"! קיום ההתפרקות דורש פליטת האלקטרונים מהקתודה, וזו עשויה להיווצר בכמה אופנים: בתנועתם לקתודה רוכשים היונים החיוביים, שנוצרו כתוצאה מההתנגשויות בין האלקטרונים לבין האטומים הנייטרליים בהשפעת השדה, אנרגיה קינטית רבה; והפצצה של יונים מהירים אלה במשטח הקתודה גורמת לשחרור האלקטרונים מהקתודה.

הקתודה עשויה לפלוט אלקטרונים כאשר היא מחוממת לטמפרטורה גבוהה. התחממות הקתודה בהתפרקות העצמאית יכולה להיווצר עקב הפצצת הקתודה ביונים חיוביים.

כאשר עוצמת השדה החשמלי גבוהה, מוענקת לאלקטרונים שבגזים אנרגיה כה גבוהה, שנגרם יינון על-ידי הפצצה באמצעות אלקטרונים אלה. ההתפרקות נעשית לעצמאית, ממשיכה ומתקיימת ללא מיינן חיצוני.

?

1. באילו תנאים התפרקות שאינה עצמאית בגזים נהיית עצמאית?
2. מדוע היינון על-ידי הפצצה של אלקטרונים בלבד אינו יכול להבטיח את קיום ההתפרקות בגזים?

### §126 פלזמה

כעת תכירו מצב צבירה רביעי: **פלזמה**. מצב צבירה זה אינו חריג, ורוב החומר ביקום נמצא בו.

בטמפרטורות נמוכות מאוד נמצאים כל החומרים במצב מוצק. החימום גורם

**זרם חשמל בגזים**

למעבר החומר ממצב מוצק לנוזל, והמשך החימום גורם להפיכת הנוזל לגז.

בטמפרטורות גבוהות מתחיל היינון של גז בעקבות ההתנגשויות בין האטומים או בין המולקולות הנעים מהר. החומר עובר למצב חדש המכונה **פלזמה**<sup>1</sup>. **פלזמה היא גז, המיוון חלקית או באופן מלא, ששוים בו ריכוזי המטענים החיוביים והשליליים**. הפלזמה כולה היא אפוא מערכת חשמלית נייטרלית. דרגת היינון של הפלזמה (השווה ליחס בין מספר היונים לבין המספר הכולל של האטומים) עשויה להיות שונה. בפלזמה המיוננת באופן מלא אין אטומים נייטרליים.

בנוסף לחימום הגז כגורם מיינן יכולים לגרום ליינון וליצירת פלזמה קרינה מסוגים שונים או הפצצת האטומים על-ידי חלקיקים טעונים ומהירים; כך נוצרת **פלזמה בטמפרטורה נמוכה**.

#### **תכונות הפלזמה**

לפלזמה שורה של תכונות ייחודיות, המאפשרות להגדירה כמצב צבירה מיוחד רביעי.

עקב ניידותם הגבוהה נעים החלקיקים הטעונים של הפלזמה בקלות בהשפעת השדות החשמלי והמגנטי. לכן כל הפרעה בנייטרליות חשמלית באזורים כלשהם של הפלזמה, הנגרמת על-ידי הצטופפות של חלקיקים בעלי אותו סימן של מטען, נעלמת במהירות. השדות החשמליים שנוצרים מניעים את החלקיקים הטעונים עד שהנייטרליות החשמלית נוצרת מחדש, והשדה החשמלי מתאפס.

בגז נייטרלי פועלים כוחות בין המולקולות, הנמצאות במרחקים קצרים זו מזו; בין החלקיקים הטעונים של הפלזמה פועלים כוחות קולון, ההולכים וקטנים עם גידול המרחק. כל חלקיק נמצא בו-זמנית תחת השפעה של חלקיקים רבים הסובבים אותו. הודות לכך עשויים חלקיקי פלזמה להשתתף בתנועה תרמית כאוטית ובתנועות מסודרות שונות של חלקיקים שמסביבם. בפלזמה נוצרים בקלות תנודות וגלים מסוגים שונים.

<sup>1</sup> מהמילה היוונית "פלסמה" – קישוט. תחילה השתמשו במילה זאת בביולוגיה כדי לסמן מרכיבים נטולי צבע בדם וברקמות חיות אחרות. בפיזיקה קיבלה המילה משמעות אחרת.

המוליכות החשמלית של הפלזמה גדלה בד-בבד עם מידת היינון. בטמפרטורה גבוהה עשויה פלזמה המיוננת באופן מלא להוליך חשמל כמעט כעל-מוליכים.

### פלזמה בחלל

רוב החומר ביקום (קרוב ל- 99%) נמצא במצב של פלזמה. עקב הטמפרטורה הגבוהה בשמש ובכוכבים אחרים נמצאת הפלזמה המוכלת בס במצב של יינון מלא.

גם החלל שבין הכוכבים מכיל פלזמה בלבד. הצפיפות של הפלזמה בחלל נמוכה מאוד – בממוצע פחות מאטום אחד לסנטימטר מעוקב אחד. היינון של האטומים בחלל שבין הכוכבים נגרם על-ידי קרינת כוכבים וקרני חלל: זרמים של חלקיקים מהירים, החודרים בכל הכיוונים ליקום. להבדיל מפלזמה שבתוך הכוכבים, טמפרטורת הפלזמה שבחלל נמוכה מאוד.

גם כדור הארץ מוקף בפלזמה. השכבה העליונה של האטמוספירה, בגובה 100 – 300 ק"מ, היא גז מיון המכונה **יונוספירה**. יינון האוויר בשכבות גבוהות אלה של האטמוספירה, מקורו בקרינת השמש ובזרימות חלקיקים טעונים הנפלטים ממנה. מעל ליונוספירה נמצאות שכבות המכונות **שכבות קרינתיות** של כדור הארץ. הן נתגלו באמצעות לוויינים, וגם הן מכילות פלזמה בלבד.

לאלקטרונים חופשיים במתכת תכונות רבות של פלזמה. להבדיל מפלזמה רגילה, אין היונים החיוביים, המהווים פלזמה בגוף מוצק, יכולים לנוע בחלקי הגוף.

גז המיון באופן חלקי או מלא מכונה **פלזמה**. כוכבים בנויים מפלזמה, ורבים מאוד השימושים של פלזמה בתעשייה ובמדע.

### דוגמה לפתרון תרגיל

חוקי הזרם במתכות ובאלקטרוליטים הם פשוטים. התרגילים הפתורים בעזרת חוק אום הובאו בפרק 15. בפרק זה מובאים בעיקר תרגילים, הדורשים שימוש בחוקי האלקטרוליזה. לפתרון חלק מהתרגילים יש להשתמש גם בנוסחה (16.1) – בתלות ההתנגדות של מוליכי מתכת בטמפרטורה. **כדור מוליך, שרדיוסו  $R = 5 \text{ cm}$ , נמצא בתוך אמבט אלקטרוליטי המלא בנחושת גופריתית. בכמה תגדל מסת הכדור, אם תהליך הציפוי בנחושת נמשך**

זרם חשמל בגזים

$t = 30 \text{ min}$ , והמטען החשמלי, המגיע בשנייה אחת לכל סנטימטר רבוע של משטח הכדור, הוא  $0.01 \text{ C}$ ?

המסה המולרית של נחושת היא  $M = 0.0635 \text{ kg/mol}$ .

### פתרון

שטח המעטפת של הכדור הוא  $S = 4\pi R^2 = 314 \text{ cm}^2$ . לכן המטען המועבר על-

ידי היונים בזמן  $t = 30 \text{ min} = 1800 \text{ sec}$  הוא:

$$\Delta q = 0.01 \frac{\text{C}}{\text{cm}^2 \cdot \text{sec}} \cdot 314 \text{ cm}^2 \cdot 1800 \text{ sec} = 5652 \text{ C}$$

מסת הנחושת שווה:

$$m = \frac{M}{neN_A} \Delta q \approx 2 \cdot 10^{-3} \text{ kg}$$

### מקבץ תרגילים 20

1. בין קצותיו של חוט ארוך נשמר מתח קבוע. הזרם העובר בחוט מחמם אותו כך, שהחוט נצבע באדום. חלק מהחוט הוכנס למים קרים. מדוע חלקו של החוט שנשאר מעל פני המים מתחמם יותר?

2. גוף חימום של תנור חשמלי נשרף, ואז חיברו את קצותיו של החלק הנותר. כיצד השתנתה כמות החום, הנפלטת על-ידי התנור בזמן מסוים?

3. סליל של אלקטרומגנט, העשוי מאלומיניום, צורך הספק של 5 קילוואט בטמפרטורה של  $0^\circ \text{C}$ . מה יהיה ההספק הנצרך, אם במהלך העבודה עלתה טמפרטורת הסליל ל- $60^\circ \text{C}$ , והמתח נשאר ללא שינוי? מה יקרה אם יישמר ערכו של הזרם בסליל?

4. כדי לצפות מוצרי מתכת באבץ מכניסים לאמבט אלקטרוליטי אלקטרודה מאבץ, שמסתה  $m = 0.01 \text{ kg}$ . איזה מטען יעבור דרך האמבט עד שהאלקטרודה תיעלם לגמרי? המקדם האלקטרוכימי של אבץ הוא

$$k = 3.4 \cdot 10^{-7} \frac{\text{kg}}{\text{C}}$$

5. על הקתודה של אמבט אלקטרוליטי הצטברה במשך של 10 דקות נחושת שמסתה 0.316 גרם. עוצמת הזרם 1.6 אמפר. מצאו את המקדם האלקטרוכימי של נחושת.

זרם חשמל בגוים

6. כיצד יש למקם אלקטרודות כדי לצפות בשיטה האלקטרוליטית את המשטח הפנימי של גוף מתכתי חלול?
7. במהלך ציפוי בניקל של רכיב במשך שעתיים היתה עוצמת הזרם העובר באמבט 25 אמפר. המקדם האלקטרוכימי של ניקל הוא  $k = 3 \cdot 10^{-7} \frac{\text{kg}}{\text{C}}$ , וצפיפות הניקל היא  $\rho = 8.9 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$ . מה עובי שכבת הניקל שנוצרה על הרכיב, אם ידוע ששטח הרכיב  $S = 0.2 \text{ m}^2$ ?
8. שדה חשמלי אחיד בעל עוצמה E נוצר במתכת ובריק. האם יעבור אלקטרון אותו מרחק באותו זמן בשני המקרים? המהירות ההתחלתית של האלקטרון שווה לאפס.
9. מצאו את מהירות האלקטרון ביציאה מתותח האלקטרוני, כאשר הפרש הפוטנציאלים בין האנודה לבין הקתודה היא 500 וולט ו-5,000 וולט.

## תקציר פרק 16

ההולכה החשמלית של מתכות מתבצעת על-ידי אלקטרונים חופשיים (הולכה אלקטרונית).

שימוש רחב בתעשיית הרדיו נעשה במוליכים למחצה, המאופיינים בהתנגדות קטנה עם עליית הטמפרטורה. התנגדותו של מוליך למחצה תלויה במידה רבה מאוד בהימצאות סיגים. השליטה הקלה במוליכות המוליכים למחצה מאפשרת להשתמש בהם כדiodות וכטרנזיסטורים – המכשירים להגברה וליצירה של תנודות חשמליות.

כדי ליצור זרם בריק יש להכניס לתוך השפופרת המרוקנת את מקור האלקטרונים: את הקתודה המחוממת.

המוליכות החשמלית של התמיסות המימיות של אלקטרוליטים מתבצעת על-ידי היונים החיוביים והשליליים (הולכה יונית).

כאשר ההולכה יונית, מלווה העברת הזרם בהצטברות החומרים, שמהם מורכב האלקטרוליט, על האלקטרודות. תהליך זה מכונה **אלקטרוליזה**, ורב בו השימוש בתעשייה.

מסת החומר הנוצר בתהליך האלקטרוליזה במשך הזמן  $\Delta t$  שווה ל:

$$m = \frac{M}{neN_A} I \Delta t$$

כאשר:  $M$  – המסה המולרית של החומר;  $n$  – הערכיות;  $N_A$  – מספר אבוגדרו;  $E$  – מטען של אלקטרון.

הגזים בטמפרטורות הקרובות לטמפרטורות החדר מורכבים ממולקולות נייטרליות, ולכן הם דיאלקטריים. במהלך החימום ובהשפעת קרינה מתרחש יינון הגזים, והם נהיים למוליכים.

מוליכות הגזים נגרמת בעיקר על-ידי היונים החיוביים והאלקטרונים. התפרקות בגז, הנפסקת עם הפסקת פעולתו של המיינן החיצוני, מכונה **התפרקות שאינה עצמאית**.

ההתפרקות נקראת **עצמאית** אם היא מתקיימת ללא פעולת המיינן. בהתפרקות עצמאית נוצרים היונים והאלקטרונים במהלך היינון כתוצאה מהפצת האלקטרונים ומפליטה תרמואלקטרית.

## מעבדות

### מבוא

אין צורך לזכור את כל הנאמר במבוא; זהו מידע עזר, שאליו יש לפנות במהלך ביצוע המעבדות.

#### 1. כיצד לחשב את שגיאות המדידה

בביצוע עבודות המעבדה יש למדוד ערכים פיזיקליים שונים ולעבד את הנתונים שהתקבלו.

**מדידה:** מציאת ערך הגודל הפיזיקלי באופן ניסויי באמצעות אמצעי מדידה.

**מדידה ישירה:** מציאת ערך הגודל הפיזיקלי במישרין באמצעות אמצעי מדידה.

**מדידה בעקיפין:** מציאת ערך הגודל הפיזיקלי על-פי הנוסחה, הקושרת אותו

לגדלים פיזיקליים אחרים שנמדדו על-ידי מדידה ישירה.

נגדיר את הסימנים הבאים:

$A, B, C, \dots$  – גדלים פיזיקליים.

$A_d$  – הערך המוערך של גודל פיזיקלי, כלומר הערך שהתקבל על-ידי מדידה

ישירה או מדידה בעקיפין.

$\Delta A$  – שגיאת מדידה מוחלטת של גודל פיזיקלי.

$\varepsilon$  – שגיאת מדידה יחסית של גודל פיזיקלי, השווה  $\varepsilon = \frac{\Delta A}{A_d} \cdot 100\%$ .

$\Delta_i A$  – שגיאת מכשיר מוחלטת, הנקבעת על-ידי מבנה המכשיר (שגיאת מכשירי

מדידה; ראו טבלה 1).

$\Delta_o A$  – שגיאת ייחוס מוחלטת, הנוצרת עקב קריאת נתונים לא מדויקת במכשיר

המדידה. ברוב המקרים שווה שגיאה זו למחצית הערך שבין שתי

שנתות צמודות בסקלה של המכשיר; במדידת הזמן שווה השגיאה

לחלוקה אחת של שעון עצר או שעון רגיל.

בהיעדר מקורות שגיאה נוספים השגיאה המוחלטת המרבית של המדידה

הישירה היא הסכום של שגיאת מכשיר מוחלטת עם שגיאת ייחוס מוחלטת:

$$\Delta A = \Delta_i A + \Delta_o A$$

מעבדות

את שגיאת המדידה המוחלטת מעגלים, בדרך כלל, לספרה אחת לאחר הנקודה העשרונית ( $\Delta A = 0.17 \approx 0.2$ ). את הערך המספרי של תוצאת המדידה מעגלים כך, שהספרה האחרונה של התוצאה תהיה באותו מקום לאחר הנקודה, כלומר במקומה של הספרה האחרונה של שגיאת המדידה המוחלטת ( $A = 10.332 \approx 10.3$ ).

התוצאות החוזרות של מדידת ערך פיזיקלי A, שנערכו באותם תנאים מבוקרים של הניסוי – אך באמצעות מכשירי מדידה מדויקים ורגישים יותר (בעלי שגיאות מדידה קטנות יותר) – שונות זו מזו.

במקרה זה מחשבים את  $A_d$  כממוצע חשבוני של כל המדידות, ואת  $\Delta A$  (במקרה זה מכנים אותה **שגיאה אקראית**) מוצאים בשיטות סטטיסטיות. למעשה לא משתמשים במעבדה בית-ספרית בשיטות סטטיסטיות מסוג זה. לכן במהלך המעבדה יש למצוא את השגיאות המוחלטות המרביות. את השגיאה היחסית של מדידות בעקיפין מחשבים בעזרת הנוסחאות המובאות בטבלה 2.

השגיאה המוחלטת של מדידות בעקיפין מחושבת לפי הנוסחה:  $\Delta A = A_d \cdot \varepsilon$ , כאשר:  $\varepsilon$  - שבר עשרוני.

### טבלה 1

**שגיאות מדידה מוחלטות של מכשירי מדידה מעבדתיים**

N	אמצעי המדידה	גבול המדידה	חלוקה	שגיאת מדידה מוחלטת
1	סרגל תלמיד פלסטי	עד 50 ס"מ	1 מ"מ	$\pm 1$ מ"מ
	סרגל שרטוט	עד 50 ס"מ	1 מ"מ	$\pm 0.2$ מ"מ
	סרגל מדידה (פלדה)	20 ס"מ	1 מ"מ	$\pm 0.1$ מ"מ
	סרגל ארוך	100 ס"מ	1 ס"מ	$\pm 0.5$ ס"מ
2	סרט מדידה	150 ס"מ	0.5 ס"מ	$\pm 0.5$ ס"מ
3	כוס מדידה	עד 250 מ"ל	1 מ"ל	$\pm 1$ מ"מ
4	קליבר	150 מ"מ	0.1 מ"מ	$\pm 0.05$ מ"מ

מעבדות

5	מיקרומטר	25 מ"מ	0.01 מ"מ	$\pm 0.005$ מ"מ
6	דינמומטר קפיצי	4 ניוטון	0.1 ניוטון	$\pm 0.05$ ניוטון
7	משקל (משקולות)	200 ג'	--	$\pm 0.01$ גרם
8	שעון עצר	0 – 30 דקות	0.2 שנייה	$\pm 1$ שנייה ב- 30 דקות
9	ברומטר (מד-לחץ)	280-720 מ"מ כספית	1 מ"מ כספית	$\pm 3$ מ"מ כספית
10	תרמומטר מעבדה	0 – 100 מעלות	1 מעלה	$\pm 1$ מעלה
11	אמפרמטר מעבדתי	2 אמפר	0.1 אמפר	$\pm 0.05$ A
12	וולטמטר מעבדתי	6 וולט	0.2 וולט	$\pm 0.15$ V

## 2. דרגת הדיוק של מכשירי מדידה

כדי למצוא שגיאת מדידה מוחלטת של מכשיר, יש לדעת את דרגת הדיוק שלו. דרגת הדיוק  $\gamma_i$  של מכשיר מדידה קובעת כמה אחוזים מכל תחום המדידה ( $A_{\max}$ ) הם שגיאת המדידה המוחלטת:

$$\gamma_i = \frac{\Delta_i A}{A_{\max}} \cdot 100\%$$

את דרגת הדיוק מציינים על המכשיר עצמו וגם במסמכים המלווים אותו (מקובל לא לרשום את סימן האחוזים). עבור מכשירי מדידה חשמליים קיימות דרגות הדיוק הבאות: 0.1, 0.2, 0.5, 1, 2.5, 4. כאשר דרגת הדיוק ( $\gamma_i$ ) ותחום המדידה ( $A_{\max}$ ) ידועים, מוצאים את שגיאת המדידה המוחלטת  $\Delta_i A$  של הערך הפיזיקלי A באמצעות המדידה במכשיר הנתון:

$$\Delta_i A = \frac{\gamma_i A_{\max}}{100}$$

## 3. כיצד להשוות את תוצאות המדידה

1. יש לרשום את תוצאות המדידה בצורת אי-שוויונים כפולים:

$$A_{i1} - \Delta A_1 < A_1 < A_{i1} + \Delta A_1,$$

$$A_{i2} - \Delta A_2 < A_2 < A_{i2} + \Delta A_2$$

מעבדות

2. יש להשוות את האינטרוולים של הערכים המתקבלים : אם האינטרוולים אינם חופפים, התוצאות שונות; ואם הם חופפים, התוצאות שוות (עבור השגיאה היחסית הנתונה).

**4. כיצד לכתוב דו"ח מעבדה**

1. מעבדה מס' ....
2. כותרת המעבדה
3. מטרת העבודה
4. שרטוט (אם נחוץ)
5. נוסחאות לערכים ולשגיאות
6. טבלת התוצאות והחישובים
7. תוצאה סופית, מסקנות וכו' (בהתאם למטרת העבודה).

**5. כיצד לרשום את תוצאת המדידה**

$$A = A_i \pm \Delta A$$

$$\varepsilon = \dots \%$$

**טבלה 2**

הנוסחאות למציאת השגיאה היחסית של מדידות בעקיפין

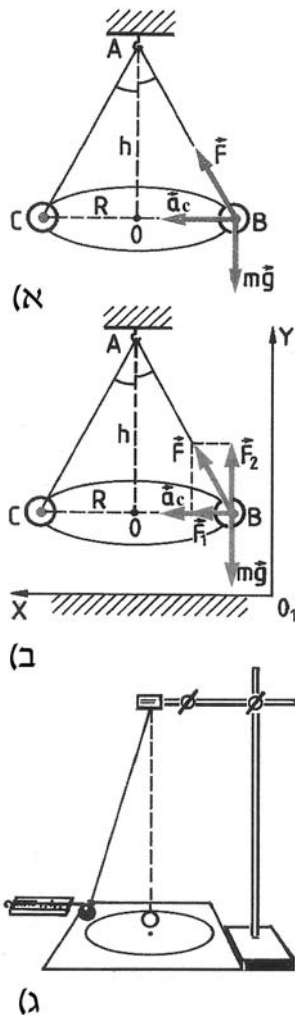
מס'	הנוסחה לערך פיזיקלי	הנוסחה לשגיאת המדידה היחסית
1	$A = BCD$	$\varepsilon = \frac{\Delta B}{B} + \frac{\Delta C}{C} + \frac{\Delta D}{D}$
2	$A = \frac{B}{CD}$	$\varepsilon = \frac{\Delta B + \Delta C}{B + C}$
3	$A = B + C$	$\varepsilon = \frac{\Delta B + \Delta C}{B + C}$
4	$A = B \sqrt{\frac{C}{D}}$	$\varepsilon = \frac{\Delta B}{B} + \frac{1}{2} \frac{\Delta C}{C} + \frac{1}{2} \frac{\Delta D}{D}$

מעבדות

## מעבדה 1

### תנועת גוף במעגל בהשפעת כוחות כבידה ומתיחות החוט

מטרת העבודה: מציאת התאוצה הצנטריפטלית של הכדור בתנועה קצובה במעגל.



ציור 254

החלק התיאורטי של העבודה: מתרגלים ניסויים במטוטלת קונית: כדורון קטן נע במעגל שרדיוסו  $R$ . החוט, שאליו קשור הכדור, נע במהלך התנועה על מעטפת של חרוט מעגלי ישר. על הכדור פועלים שני כוחות: כוח הכבידה  $mg$  ומתיחות החוט  $\vec{F}$  (ציור 254א), היוצרים תאוצה צנטריפטלית  $a_c$ , המכוונת למרכז המעגל. את גודל התאוצה אפשר למצוא בעזרת הנוסחאות הקינמטיות. הוא שווה:

$$a_c = \omega^2 R = \frac{4\pi^2 R}{T^2}$$

על מנת למצוא תאוצה צריך למדוד את רדיוס המעגל ואת זמן המחזור של סיבוב הכדור במעגל. את התאוצה הצנטריפטלית (הנורמלית) אפשר למצוא גם באמצעות השימוש בחוקי הדינמיקה: בהתאם לחוק השני של ניוטון:  $m\vec{a} = m\vec{g} + \vec{F}$ . נפרק את כוח  $\vec{F}$  לרכיבים  $\vec{F}_1$  ו- $\vec{F}_2$ , המכוונים ככיוון רדיוס המעגל למגמת המרכז, ואנכית כלפי מעלה, בהתאמה.

החוק השני של ניוטון יירשם באופן הבא:

$$m\vec{a} = m\vec{g} + \vec{F}_1 + \vec{F}_2$$

את כיווני הצירים נקבע כמצויר בציור 254ב.

בהיטלים לציר  $O_1Y$  משוואת התנועה של הכדור היא  $0 = F_2 - mg$ . מכאן:  $F_2 = mg$ , ופירושו: הרכיב  $\vec{F}_2$  מקזז את כוח הכבידה  $m\vec{g}$  הפועל על הכדור.

מעבדות

נרשום את החוק השני של ניוטון בהיטלים על הציר  $O_1x$ :  $ma_c = F_1$ .

מזה מקבלים:  $a_c = \frac{F_1}{m}$ . את גודלו של הרכיב  $F_1$  אפשר למצוא בשיטות שונות:

ראשית, אפשר לעשות זאת מדמיון המשולשים  $OAB$  ו-  $FBF_1$ :

$$\frac{F_1}{R} = \frac{mg}{h}$$

$$. a_c = \frac{gR}{h} \text{ ו- } F_1 = \frac{mgR}{h}$$

שנית, את גודלו של הרכיב  $F_1$  אפשר למדוד במישרין על-ידי מד-כוח. כדי לעשות זאת נקשור לכדור את מד-הכוח, נמשוך אותו אופקית למרחק השווה לרדיוס המעגל (ציור 254ג), ונרשום את הקריאה של מד-הכוח. הכוח האלסטי של הקפיץ מקוז את הרכיב  $\vec{F}_1$ .

נשווה את כל שלושת הביטויים ל-  $a_c$ :

$$a_c = \frac{4\pi^2 R}{T^2}, a_c = \frac{gR}{h}, a_c = \frac{F_1}{m}$$

ונוודא שהערכים קרובים ביניהם.

בעבודה זו יש להקפיד על דיוק במדידת הזמן; טוב למדוד את משכם של מספר

רב של סיבובים ולחלק במספרם. דרך מדידה זו תקטין את השגיאה היחסית.

אין צורך לשקול את הכדור ברמת דיוק גבוהה; די לשקול בדיוק עד  $1 \text{ g}$ . את

גובה החרוט ואת רדיוס המעגל די למדוד בדיוק  $1 \text{ cm}$ . עבור דיוק זה של המדידה

תהיינה השגיאות היחסיות של ערכים אלה באותו סדר גודל.

ה צ י ו ד: מעמד עם תפסן, סרט מדידה, מחוגה, מד-כוח מעבדתי, מאזניים

ומשקולות, כדור הקשור לחוט, חתיכת שעם ולה נקב, דף נייר, סרגל.

הנחיות לעבודה

1. שוקלים את מסת הכדור בדיוק של  $1 \text{ גרם}$ .

2. מעבירים חוט דרך הנקב בשעם, ותופסים את חתיכת השעם בתפסן המעמד.

3. מציירים על הנייר מעגל ברדיוס של כ-  $20 \text{ ס"מ}$ . מודדים את הרדיוס בדיוק של  $1 \text{ ס"מ}$ .

4. ממקמים את המעמד כך, שהמשך קו החוט יעבור דרך מרכז המעגל.

5. תופסים את החוט ליד נקודת הקשירה לתפסן, ומניעים את הכדור כך שישתובב

מעבדות

במעגל הקרוב במידותיו למעגל המצויר על הנייר.

6. מודדים את משך הזמן שבו תסוב המטוטלת – לדוגמה  $N = 50$  סיבובים.

7. מודדים את גובה המטוטלת הקונית על-ידי מדידת המרחק האנכי בין נקודת הקשירה לבין מרכז המעגל.

8. מוצאים את גודל התאוצה הצנטריפטלית לפי הנוסחאות:

$$a_c = \frac{4\pi^2 R}{T^2}, \quad a_c = \frac{gR}{h}$$

9. מושכים את הכדור באמצעות מד-הכוח, הקשור אליו אופקית, למרחק השווה לרדיוס המעגל, ומודדים את גודל הרכיב  $\vec{F}_1$ . מחשבים את התאוצה לפי הנוסחה:

$$a_c = \frac{F_1}{m}$$

10. את התוצאות רושמים בטבלה.

### טבלה 3

מס'	R	N	$\Delta t$	$T = \frac{\Delta t}{N}$	h	m	$a_c = \frac{4\pi^2 R}{T^2}$	$a_c = \frac{gR}{h}$	$a_c = \frac{F_1}{m}$

## מעבדה 2

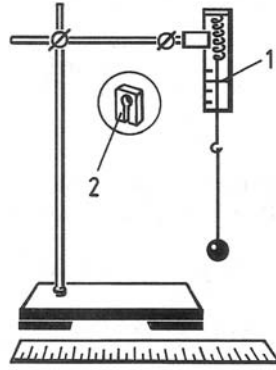
### חוק שימור האנרגיה המכנית

מטרת העבודה: למדוד את האנרגיה הכובדית של גוף, הנמצא מעל פני הקרקע, ושל קפיץ המתוח באופן אלסטי, ולהשוות בשני מצבים את ערכה של אנרגיית המערכת.

הציד: מעמד עם תפסן, סרט מדידה, מד-כוח מעבדתי עם מקבע, משקולת על חוט באורך של כ- 25 ס"מ.

מעבדות

### הוראות העבודה



ציור 255

על מנת לבצע את העבודה מרכיבים מערכת כמתואר בציור 255. את מד-הכוח מרכיבים בזרוע של תפסן. כמקבע של מד-הכוח משמשת לוחית משעם שממדיה  $5 \times 7 \times 1.5$  mm. בציור 255 אפשר לראות את הלוחית בהגדלה (המסומנת ב-2). את לוחית השעם חותכים בסכין עד לאמצעה, ומרכיבים אותה על מוט המתכת של מד-הכוח. המקבע צריך לנוע לאורך המוט בחיכוך מועט.

תחילה בודקים את מנגנון המקבע: ממקמים אותו בחלק התחתון של המוט, מותחים את הקפיץ עד הקצה ומשחררים אותו. המקבע עולה עם המוט ומראה את מידת ההתארכות המרבית של הקפיץ.

### סדר ביצוע העבודה

1. קושרים משקולת לחוט, ואת קצהו השני של החוט קושרים לוו של מד-הכוח; מודדים את המשקל  $F_1 = mg$ .
2. מודדים את המרחק  $l$  מהוו של מד-הכוח למרכז הכובד של המשקולת.
3. מרימים את המשקולת עד לגובה הוו של מד-הכוח ומשחררים אותה. כאשר מרימים את המשקולת, צריך הקפיץ להיות רפוי. מקבעים את המקבע ליד קצה המסגרת. מורידים את המשקולת, ולפי מיקום המקבע מודדים את ההתארכות המרבית  $\Delta l$  של הקפיץ.
4. מושכים את הקפיץ ביד עד לנגיעת המקבע במסגרת, וקוראים על הסקלה את הערך המרבי של הכוח האלסטי. הערך הממוצע של כוח זה שווה ל-  $F/2$ .
5. מוצאים את גובה הנפילה של המשקולת. הוא שווה:  $h = l + \Delta l$ .
6. מחשבים את אנרגיית הכבידה של המערכת במצב ההתחלתי, לפני התחלת הנפילה, כאשר רמת האפס של האנרגיה הכובדית היא הגובה במצב הסופי:

$$E_p' = mgh = F_1(l + \Delta l)$$

7. במצב הסופי שווה האנרגיה הפוטנציאלית של המשקולת לאפס. במצב זה שווה האנרגיה של המערכת לאנרגיה האלסטית של הקפיץ המתוח בלבד:

$$E_p'' = \frac{k\Delta l^2}{2} = \frac{F \cdot \Delta l}{2}$$

חשבו אותה.

8. את התוצאות רושמים בטבלה.

#### טבלה 4

$E_p'' = \frac{F \cdot \Delta l}{2}$	$E_p' = F_1(l + \Delta l)$	$h = l + \Delta l$	F	$\Delta l$	l	$F_1 = mg$

9. משווים בין ערך האנרגיה במצב הראשון לבין ערך האנרגיה במצב השני, ומסיקים מסקנות.

#### מעבדה 3

#### בדיקה ניסויית של חוק גיי-לוסק

בציור 256 מראים את הציוד הנדרש כדי לבצע את המעבדה: צינור זכוכית באורך 600 מ"מ וקוטר 8 – 10 מ"מ, האטום בקצהו האחד; כלי גלילי בגובה 600 מ"מ ובקוטר 40 – 50 מ"מ, הממולא במים חמים ( $t \approx 60^\circ\text{C}$ ); כוס מים בטמפרטורת החדר; ופלטלינה.

כדי לבדוק את חוקו של גיי-לוסק, די למדוד את הנפח ואת הטמפרטורה של הגז

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2} \quad \text{בשני מצבים תחת לחץ קבוע, ולוודא את קיום השוויון:}$$

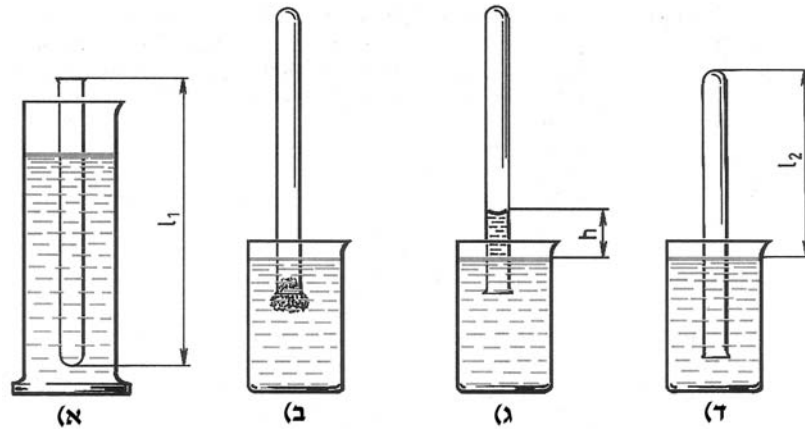
זאת אפשר לבצע באמצעות אוויר בלחץ אטמוספרי:

מכניסים את צינור הזכוכית כשהקצה הפתוח כלפי מעלה ל- 3–5 דקות לכלי שבתוכו מים חמים (ציור 256). במצב ראשון זה שווה נפח האוויר  $V_1$  לנפח צינור הזכוכית, והטמפרטורה של האוויר שווה לטמפרטורת המים החמים  $T_1$ . כדי שבעת המעבר למצב השני לא תשתנה כמות האוויר, אוטמים את קצהו הפתוח של הצינור בפלטלינה. מוציאים את הצינור מהמים החמים, ומכניסים אותו מיד

מעבדות

לתוך כוס מים קרים, כאשר הקצה האטום כלפי מטה (ציור 256ב), ומסירים את הפלסטלינה. במהלך התקררות האוויר בצינור יעלו המים לתוך הצינור. לאחר שהמים יפסיקו לעלות (ציור 256ג), יהיה נפח האוויר בצינור  $V_2 < V_1$ , והלחץ:

$$p = p_{\text{atm}} - \rho gh$$



ציור 256

כדי שלחץ האוויר בצינור יהיה שווה ללחץ האטמוספרי, יש להגדיל את עומק הטבילה של הצינור בכוס עד למצב, שבו רמות המים בכוס ובצינור תהיינה באותו גובה (ציור 256ד). זה המצב השני של האוויר בצינור בטמפרטורה  $T_2 -$  זו של האוויר בחדר. את יחס הנפחים של האוויר בצינור בשני המצבים אפשר להחליף ביחס הגבהים של עמודי האוויר בצינור במצבים אלה (אם חתך הצינור קבוע לכל אורך הצינור):  $\frac{V_1}{V_2} = \frac{Sl_1}{Sl_2} = \frac{l_1}{l_2}$ . לכן אפשר להשוות את היחסים של  $l_1/l_2$  ושל  $T_1/T_2$ . את הגובה של עמודי אוויר מודדים באמצעות סרגל, ואת הטמפרטורה – באמצעות מד-חום.

הנחיות לביצוע המעבדה

1. הכינו טופס עם טבלה (ראו טבלה 5) כדי לרשום את תוצאות המדידות והחישובים (שגיאות המדידה מחושבות בעזרת טבלה 1).

מעבדה

מחושב						מדוד				
$\Delta_0 T$	$\Delta_i T$	$T_2$	$T_1$	$\Delta l$	$\Delta_0 l$	$\Delta_i l$	$t_2$	$t_1$	$l_2$	$l_1$
K	K	K	K	מ"מ	מ"מ	מ"מ	°C	°C	מ"מ	מ"מ
מחושב										
				$\Delta_2$	$\varepsilon_2$	$\frac{T_1}{T_2}$	$\Delta_1$	$\varepsilon_1$	$\frac{l_1}{l_2}$	$\Delta T$
					%			%		K

2. הכינו כוס מים בטמפרטורת החדר וכלי ובו מים חמים.

מהלך הניסוי ועיבוד הנתונים

1. מדידת האורך  $l_1$  של צינור זכוכית ומדידת הטמפרטורה של המים בכלי הגלילי.

2. העברת האוויר בצינור למצב השני, כפי שתואר קודם; מדידת האורך  $l_2$  של עמוד

האוויר ומדידת הטמפרטורה  $T_2$  של האוויר בחוץ.

3. חישובי היחסים  $\frac{l_1}{l_2}$  ו-  $\frac{T_1}{T_2}$ , חישובי השגיאות היחסיות ( $\varepsilon_1$  ו-  $\varepsilon_2$ ) והמוחלטות

( $\Delta_1$  ו-  $\Delta_2$ ) לפי הנוסחאות:

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta l}{l_1} + \frac{\Delta l}{l_2}, \quad \Delta_1 = \frac{l_1}{l_2} \varepsilon_1$$

$$\varepsilon_2 = \frac{\Delta T}{T_1} + \frac{\Delta T}{T_2}, \quad \Delta_2 = \frac{T_1}{T_2} \varepsilon_2$$

4. השוואת היחסים  $\frac{l_1}{l_2}$  ו-  $\frac{T_1}{T_2}$  (ראו סעיף 3 של המבוא למעבדות).

5. מסקנות.

שאלות

1. מדוע עולה מפלס המים בצינור לאחר הסרת הפקק של הפלסטלינה מפתח

הצינור הנמצא מתחת לפני המים?

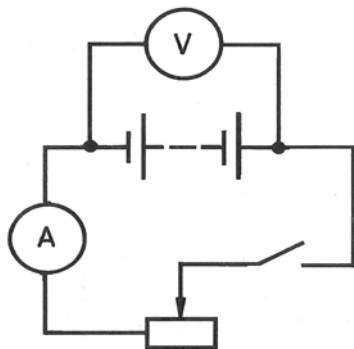
מעבדות

2. לאחר השוואת מפלסי המים בצינור ובכוס שווה לחץ האוויר בצינור ללחץ האטמוספרי. מדוע?

#### מעבדה 4

#### מדידת כא"מ והתנגדות הפנימית של מקור זרם

המעגל החשמלי לעבודת מעבדה זו מוצג בציור 257. כמקור זרם משתמשים במצבר או בסוללה של פנס כיס.



ציור 257

כאשר המעגל פתוח, שווה הכא"מ של מקור הזרם למתח בקצות המעגל החיצוני. למקור הזרם מחובר וולטמטר, אשר התנגדותו אמורה להיות גדולה בהרבה מהתנגדות הפנימית  $r$  של מקור הזרם. בדרך כלל ההתנגדות של מקור הזרם קטנה, ולכן אפשר להשתמש למדידת המתח בוולטמטר של המעבדה בתחום שבין 0 ל-6 וולט ובהתנגדות של  $R_V = 900 \Omega$ .

מכיוון שהתנגדות המקור בדרך כלל קטנה, מתקיים  $R_V \gg r$ . בתנאים אלה אין ההבדל בין  $\varepsilon$  לבין  $U$  עולה על כמה עשיריות האחוז, ולכן דיוק המדידה של הכא"מ שווה לדיוק המדידה של המתח.

את ההתנגדות הפנימית של מקור הזרם אפשר למדוד בעקיפין: על-ידי רישום נתוני האמפרמטר והוולטמטר כאשר המעגל סגור. מחוק אום למעגל סגור (ראו סעיף 110) מקבלים:  $\varepsilon = U + Ir$ , כאשר:  $U = IR$  – המתח על הקטע החיצוני של המעגל. לכן:  $r_i = \frac{\varepsilon_i - U_i}{I_i}$ . למדידת הזרם במעגל אפשר להשתמש באמפרמטר מעבדתי בעל תחום מדידה בין 0 ל-2 אמפר. את השגיאות המרביות של מדידת ההתנגדות הפנימית של מקור הזרם אפשר לחשב לפי הנוסחאות:

$$\varepsilon_r = \frac{\Delta \varepsilon + \Delta U}{\varepsilon_i - U_i} + \frac{\Delta I}{I_i},$$

$$\Delta r = r_i \cdot \varepsilon_r$$

מעבדות

הכנות לעבודת המעבדה

1. הכינו טופס עם סכמת המעגל וטבלה (ראו טבלה 6) לרישום תוצאות המדידות והחישובים.

טבלה 6

מחושב						מדוד			מס' הניסוי
$r_i$	$\varepsilon_\varepsilon$	$\varepsilon_U$	$\Delta U$	$\Delta_o U$	$\Delta_a U$	$\varepsilon_i$	$I_i$	$U_i$	
$\Omega$	%	%	V	V	V	V	A	V	
									מדידה $\varepsilon$
									מדידה $r$
מחושב									
$\Delta r$	$\varepsilon_r$	$\varepsilon_I$	$\Delta I$	$\Delta_o I$	$\Delta_a I$				
$\Omega$	%	%	A	A	A				
									מדידה $\varepsilon$
									מדידה $r$

2. הרכיבו מעגל חשמלי בהתאם לציור 257. יש לבדוק את בטיחות המגעים החשמליים ואת נכונות החיבור של האמפרמטר והוולטמטר.

3. בדקו את עבודת המעגל במצב סגור ובמצב פתוח.

מהלך הניסוי ועיבוד נתונים

1. מדידת הכא"מ של מקור הזרם.

2. רישום קריאות האמפרמטר והוולטמטר במצב מעגל סגור וחישוב  $r_i$ ; חישוב שגיאת המדידה המוחלטת והשגיאה היחסית של הכא"מ ושל ההתנגדות הפנימית של מקור הזרם בעזרת נתוני דרגת הדיוק של המכשירים.

3. רישום תוצאות המדידה של הכא"מ ושל ההתנגדות הפנימית של מקור הזרם:

$$\varepsilon = \varepsilon_i \pm \Delta\varepsilon, \quad \varepsilon_\varepsilon = \dots\%, \quad r = r_i \pm \Delta r, \quad \varepsilon_r = \dots\%$$

מעבדות

ש א ל ו ת

1. מדוע שונות קריאות הוולטמטר במצב מעגל פתוח ובמצב מעגל סגור?
2. כיצד אפשר להגדיל את דיוק המדידה של הכא"מ של מקור הזרם?
3. הציעו שיטות אחרות למדידה של כא"מ ושל ההתנגדות הפנימית של מקור הזרם.

### מעבדה 5

#### חקירת חיבור מוליכים בטור ובמקביל

במעבדה זו יש לבדוק את החוקים הבאים:

1. חיבור מוליכים בטור:

$$U = U_1 + U_2, R = R_1 + R_2, \frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2}$$

2. חיבור מוליכים במקביל:

$$I = I_1 + I_2, \frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}, \frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1}$$

במעבדה זו משתמשים במקור זרם, שני נגדי תיל, אמפרמטר, וולטמטר ונגד משתנה. את הוולטמטר והאמפרמטר מחברים לנקודות המתאימות במעגל לפי הצורך במהלך העבודה.

הנחיות לביצוע המעבדה

הכינו טופס לרישום תוצאות המדידה, החישובים ולדו"ח המסכם (את הטבלאות הכינו בעצמכם לפי הדוגמאות שבמעבדות הקודמות).

ביצוע הניסוי והסקת מסקנות

1. הרכיבו מעגל לחקירת חיבור הנגדים בטור; מדדו את עוצמות הזרם והמתחים; בדקו את קיומם של חוקי החיבור; הסיקו מסקנות.
2. הרכיבו מעגל לחקירת חיבור הנגדים במקביל; מדדו את המתחים ואת עוצמות הזרמים; בדקו את קיומם של חוקי החיבור; הסיקו מסקנות.

ש א ל ת ב ק ר ה

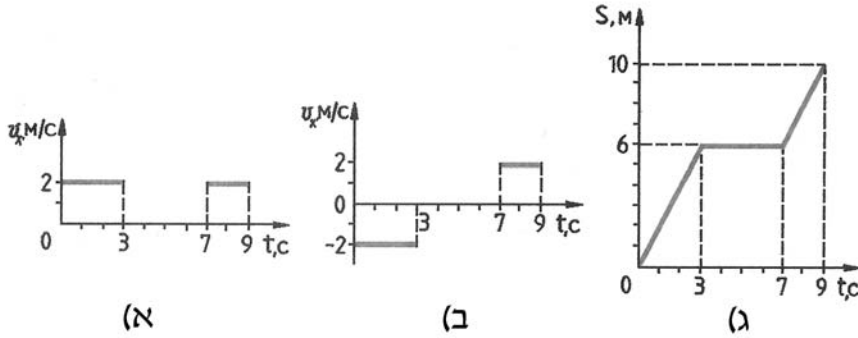
כיצד מחוברים צרכני אנרגיית החשמל בבית? מדוע? כיצד מחוברות נורות חשמל בשרשרת קישוט? מדוע?

מעבדות

**תשובות לתרגילים**

**מקבץ תרגילים 1**

- 1.  $0-10$  m .
- 2.  $-6$  m ;  $18$  m .
- 3.  $4$  sec ,  $16$  m .
- 4. ראו גרפים בצירור 258 א, ב, ג.



**מקבץ תרגילים 2**

- 1.  $30$  m/sec במגמת התנועה של המכונית הראשונה ;  $30$  m/sec במגמת התנועה של המכונית השנייה.
- 2.  $21.5$  sec .
- 3.  $4$  m/sec בזווית של  $60^\circ$  יחסית לחוף.

**מקבץ תרגילים 3**

- 1.  $12$  m/sec בכיוון החיובי של הציר.
- 2.  $0$  ;  $8$  m/sec בכיוון הנגדי של הציר.
- 3.  $-5$  m ,  $-0$  m ,  $-5$  m ,  $10$  m .
- 4.  $10$  sec .

**מקבץ תרגילים 4**

- 1.  $20$  m/sec ;  $20$  m/sec .
- 2.  $1$  sec ;  $7.5$  m/sec .
- 3.  $80$  m ;  $4$  sec .
- 4.  $50$  m/sec ;  $80$  m ;  $120$  m .
- 5.  $1.4$  sec ;  $28$  m ;  $24.5$  m/sec .
- 6.  $14$  m ;  $39$  m ;  $14$  m/sec ;  $14.5$  m/sec ;  $8$  m ;  $28$  m .

תשובות לתרגילים

**מקבץ תרגילים 5**

1. 6000 rev/min  
2. 0.6 cm/sec

**מקבץ תרגילים 6**

1. התאוצה בכיוון הכוח; לגבי כיוון המהירות – לא ניתן להסיק.  
2. 5.5 N  
3. 25 N  
4. 35 N  
5. 400 N  
6. 43,000 N  
7. 70 kN  
8. 0.6 N כלפי מעלה; 0.6 N כלפי מטה  
9. 140 N; 30.6 m/sec  
10. 56 N; 4 m/sec<sup>2</sup>

**מקבץ תרגילים 7**

1. 0.175 m/sec<sup>2</sup>, כלומר בערך פי 6 פחות מאשר על פני כדור הארץ.  
2. 4 m/sec<sup>2</sup>  
3. 7.8 m/sec<sup>2</sup>, 2.6 sec  
4. 252 N, 200 N

**מקבץ תרגילים 8**

1. 0.6 m/sec  
2. 0.17 m/sec  
3. 5.6 m/sec בזווית 36° לחוף.  
4. המהירות תגדל.  
5. 15 N  
6. 8 cm/sec  
7. 10 m/sec

**מקבץ תרגילים 9**

1. האנרגיה הפוטנציאלית של מולקולות חומרי השריפה שווה לאנרגיה הפוטנציאלית של נפט לפני השריפה.  
2. 15 J  
3. 17,400 J  
4. 500 J  
5. 1 m/sec  
6. 18 J  
7. 200 kW  
8. ללבנה.  
9. 1.2 m

תשובות לתרגילים

**מקבץ תרגילים 10**

- 700 N .4  
 8.7 N·m .5  
 .1 m .6  
 .70 N .7  
 .200 N ,400 N .8

**מקבץ תרגילים 11**

1. לא גדול מ- $12 \text{ m}^2$   
 2. 0.004 kg/mole ,0.002 kg/mole  
 3. פי-שתיים.  
 4.  $\approx 0.056 \text{ mole}$   
 5.  $\approx 1.88 \cdot 10^{23}$   
 6.  $\approx 4.65 \cdot 10^{-26} \text{ kg}$   
 7.  $\approx 8.5 \cdot 10^{28}$   
 8.  $\approx 5.7 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3$   
 9. יקטן פי 3.  
 10.  $5 \cdot 10^5 \text{ Pa}$   
 11.  $6 \cdot 10^{-21} \text{ J}$   
 12.  $4.9 \cdot 10^5 \text{ m}^2/\text{sec}^2$

**מקבץ תרגילים 12**

1.  $2.76 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}_{\text{חדש}}$   
 2.  $\approx 6 \cdot 10^{-21} \text{ J}$   
 3.  $3.14 \cdot 10^4$   
 4. יותר מולקולות באוויר.  
 5.  $5.3 \cdot 10^{-26} \text{ kg}$   
 6.  $\approx 0.5 \%$

**מקבץ תרגילים 13**

1. 12 kPa  
 2. 20  
 4. 250 K  
 6.  $\approx 0.0224 \text{ m}^3/\text{mole}$   
 8.  $\approx 5.8 \cdot 10^{-3} \text{ kg/mole}$   
 9.  $\approx 0.15 \text{ m}^3$   
 10.  $\approx 0.49 \text{ kg/m}^3$   
 13. פי 1.7

**מקבץ תרגילים 14**

3.  $\approx 0.59 \text{ kg/m}^3$   
 6.  $\approx 0.92 \text{ kg}$   
 7.  $\approx 0.21 \text{ kg}$

תשובות לתרגילים

**מקבץ תרגילים 15**

1. האנרגיה תגדל פי 1.5
2.  $2.5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$
3. האנרגיה פחתה.
4.  $\approx 34.4 \text{ J}$
8. ב-  $\frac{m}{M} R \Delta T$
9.  $1.25 \cdot 10^6 \text{ J}$
10.  $20 \text{ J}$
11.  $2 \cdot 10^5 \text{ J}$
12.  $\approx 10 \text{ K}$
13.  $\approx 37 \text{ }^\circ\text{C}$
14.  $0 \text{ }^\circ\text{C}$
15.  $1500 \text{ K}$
16.  $\approx 42\%$ ;  $20\%$

**מקבץ תרגילים 16**

2.  $\approx 9.2 \cdot 10^{-8} \text{ N}$
3.  $\approx 2.3 \cdot 10^{39}$
4.  $\approx 2.3 \cdot 10^6 \text{ N}$
5.  $1.0 \cdot 10^{-6} \text{ N}$ , כוח המשיכה;  $6.9 \cdot 10^{-7} \text{ N}$ , כוח הדחייה.
6.  $1.1 \cdot 10^{-6} \text{ N}$ , בכיוון המטען השני.

**מקבץ תרגילים 17**

1.  $1.5 \cdot 10^{-16} \text{ C}$ ;  $\approx 940$  אלקטרונים עודפים.
4.  $1.6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ ;  $-1.6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$
5.  $E = k \frac{\sqrt{q_1^2 + q_1 q_2 + q_2^2}}{r^2}$
7.  $4000 \text{ V/m}$
9.  $-2.3 \cdot 10^3 \text{ V}$

**מקבץ תרגילים 18**

1.  $\approx 1.7 \cdot 10^{-5} \text{ C}$
2.  $\approx 5.5 \text{ mm}$
3.  $U_1 = \frac{d_1 U}{d} = 700 \text{ V}$

תשובות לתרגילים

**מקבץ תרגילים 19**

- .2  $\approx 15.8 \text{ m}$  ;  $\approx 1.4 \text{ mm}^2$   
.3  $\approx 4.9 \cdot 10^{-4} \text{ m/sec}$   
.4 פי 2 פחות; פי 2 יותר.  
.6 1200 A

**מקבץ תרגילים 20**

- .5  $\approx 3.3 \cdot 10^{-7} \text{ kg/C}$   
.7  $\approx 3 \cdot 10^{-5} \text{ m}$   
.3  $\approx 6.1 \text{ kW}$  ;  $\approx 4.1 \text{ kW}$   
.4  $\approx 2.9 \cdot 10^4 \text{ C}$   
.9  $\approx 4.19 \cdot 10^7 \text{ m/sec}$  ;  $\approx 1.33 \cdot 10^7 \text{ m/sec}$

## נספח א. חישוב שגיאות באמצעות נגזרות חלקיות

### 1. מבוא

כאשר מודדים אנו ערך פיזיקלי באמצעות מכשיר שמוודד אותו במישרין, כמידת מרחק באמצעות סרגל או מדידת פרק זמן באמצעות שעון, נגרמת השגיאה בערך הנמדד עקב אי-דיוק של המדידה הישירה, וערכה כערך אי-הדיוק של מכשיר המדידה.

לדוגמה: מדידת המרחק באמצעות סרגל, שדיוק המדידה שלו 0.5 מ"מ, מביאה לתוצאה המדויקת עד ל- 0.5 mm  $\pm$ ; ומדידת פרק זמן באמצעות שעון-עצר אפשרית עד לדיוק של 0.1 sec  $\pm$ .

אולם מה יהיה דיוק ערך פיזיקלי מחושב, המתבסס על מדידה שאינה ישירה, אלא המבוססת על מדידות משניות עקיפות? לדוגמה: מדידת המהירות?

הרי אפשר למדוד מהירות באמצעות מדידות ההעתק ופרק הזמן שארך ביצוע ההעתק ולהציבם בנוסחה:

$$v = \frac{dx}{dt}$$

מה תהיה השגיאה במקרה של חישוב המבוסס על מדידות ערכים, שלכל אחד מהם דיוק מדידה משלו? האם במקרה של מדידת המהירות תהיה שגיאת המדידה

$$??? \Delta v = \frac{\pm 0.5 \text{ mm}}{\pm 0.1 \text{ sec}} = \pm 5 \frac{\text{mm}}{\text{sec}} \quad ???$$

**התשובה היא: לא!**

### 2. חישוב שגיאות של ערך פיזיקלי שהוא פונקציה של ערכים מדודים

ניזכר במהות הנגזרת של  $y(x)$  לפי המשתנה  $x$ :

$$\frac{dy}{dx} = y'(x)$$

$dx$  קטן מאוד, וכיוצא מכך, גם  $dy$  קטן למדי.

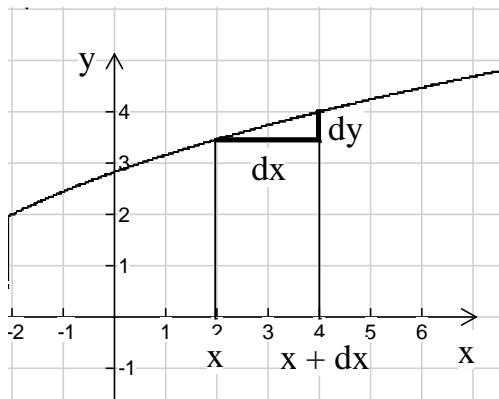
נכפול את שני האגפים ב-  $dx$ . פעולה פשוטה זו מביעה קשר, שהיה נסתר מעינינו

קודם לכן: אם נלך לאורך העקומה, תהא תוספת הגובה  $dy$  שווה למכפלת הנגזרת

$y'(x)$  ב-  $dx$ :

נספח א: חישוב שגיאות באמצעות נגזרות חלקיות

$$dy = y'(x) \cdot dx$$



תהא הפונקציה  $y(x)$  ערך מחושב משתנה, הנובע ממדידה של ערכי  $x$  שונים. במקום שם ערכו של הערך הנמדד  $x$  יהא  $x_1$ , יהא ערך הפונקציה  $y_1$ . בעבור סטייה של הערך הנמדד  $x$  בשיעור  $dx$  תהיה סטייה בערך הפונקציה  $y(x)$ , שערכה ככתוב מעלה:

$dy = y'(x) \cdot dx$ . אם כך, נוכל עתה לחשב סטיות בערך הפונקציה בגין שגיאות בערך הנמדד.

לדוגמה: תהא הפונקציה  $y(x)$  בתלות  $x$ :  $y(x) = 3x^2$ . נחשב את ערך הפונקציה

במקום שם  $x = 2.1$ :

$$y = 3 \cdot 2.1^2 = 13.23$$

מדדנו את  $x$ , אך בגלל מידת אי-דיוק המדידה או בגלל מידת רגישות מכשיר המדידה, שגינו במדידת  $x$  בשיעור  $0.1$ . עתה אין חשיבות למגמת השגיאה הנמדדת (תוספת או מגרעת).

אי לכך תהא השגיאה בערך המחושב של הפונקציה, בערכה המוחלט:

$$dy = y'(x=2.1) \cdot dx$$

$$|dy| = 6 \cdot 2.1 \cdot 0.1 = 1.26$$

כשנציג את הערך המחושב  $y$ , נביא בחשבון שהשגיאה המחושבת עשויה להיות

תוספת או מגרעת לערך המחושב  $y$ , ולכן נראה שראוי לרשום:

$$y = 13.23 \pm 1.3$$

אולם יש לדייק ברישום הערך המחושב  $y$  ברמת הדיוק של השגיאה שבמדידה,

**נספח א: חישוב שגיאות באמצעות נגזרות חלקיות**

כי אין טעם בהצגת הערך המחושב  $y$  ברמת דיוק רבה יותר מאשר סדר הגודל של השגיאה הצפויה.

$$y = 13.2 \pm 1.3 \quad \text{אי לכך:}$$

כלומר: ערך  $y$  עשוי להשתנות מ-  $y = 11.9$  ועד ל-  $14.5$ .

עתה לפנינו פונקציה  $y$  התלויה בשני משתנים, ב-  $x$  ו ב-  $z$ . שני המשתנים הם שתי מדידות בשני מכשירים שונים, כל מכשיר ורמת דיוקו עמו.

כאשר נבדוק את השגיאה בערך המחושב בגין שגיאת המדידה ב-  $x$ , נשכח ש-  $z$  גם הוא משתנה, הקובע את ערכה של הפונקציה, ונתייחס אליו כקבוע; מכפלת נגזרת הפונקציה לפי  $x$  בשגיאת המדידה  $dx$  תיתן את חלקה של השגיאה בערך המחושב  $y$  בגלל השגיאה במדידת  $x$ . כך ננהג גם לגבי המשתנה השני  $z$ , וכך גם ננהג במשתנים – כלא תלויים זה בזה – בפונקציה רבת-משתנים.

הגזירה לפי אחד המשתנים, בעוד מתייחסים לאחרים כקבועים, מכונה **נגזרת חלקית**.

את שגיאות הערך המחושב  $y$  בגין המדידות השגויות של המשתנים מסכמים בערכיהן המוחלטים של השגיאות, למען הצגה נאותה של שגיאת החישוב המרבית, שעלולה לחול לשני הכיוונים: למעלה ולמטה.

נכון יהיה להתבונן היטב בחישוב השגיאות המסתכמות ולהבחין איזו שגיאה בגין איזו מדידה של משתנה גדולה או קטנה בשיעור ניכר מהאחרות; ועוד לפני שנסכם את השגיאות, הנובעות משגיאות המדידה של המשתנים השונים, יהיה נכון לעשות שימוש במכשיר מדידה מדויק יותר חלף המכשיר שבגינו גדולה השגיאה, מחד, או להרשות לעצמנו להשתמש במכשיר מדויק פחות (וזול יותר) חלף המכשיר שבגינו קטנה השגיאה, מאידך.

את תוצאת החישוב נרשום ברמת הדיוק של השגיאה המצטברת. להלן דוגמה מספרית:

$$R = \rho \frac{1}{\frac{\pi d^2}{4}} \quad \text{תהא הפונקציה:}$$

הערכים הנמדדים ושגיאותיהם, לשני הכיוונים:

**נספח א: חישוב שגיאות באמצעות נגזרות חלקיות**

$$l = 7.3 \pm 0.1 \text{ [m]}$$

$$d = 3.1 \pm 0.1 \text{ [mm]}$$

$$\rho = 1.52 \pm 0.02 \left[ \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}} \right] \quad (\text{מטבלה})$$

נחשב את ערכה של הפונקציה R :

$$R = 1.52 \cdot \frac{7.3 \cdot 4}{\pi \cdot 3.1^2} = 1.470 \Omega$$

עתה יש לחשב את השגיאה הצפויה בחישוב הפונקציה R עקב שגיאות המדידה

של המשתנים :

$$dR = |R'(\rho) \cdot d\rho| + |R'(l) \cdot dl| + |R'(d) \cdot d(d)| =$$

$$= \left| \frac{1}{\frac{\pi d^2}{4}} d\rho \right| + \left| \frac{\rho}{\frac{\pi d^2}{4}} dl \right| + \left| \frac{4\rho l \cdot 2}{d^3} \cdot d(d) \right| =$$

$$= \left| \frac{7.3}{\frac{\pi 3.1^2}{4}} \cdot 0.02 \right| + \left| \frac{1.52}{\frac{\pi 3.1^2}{4}} \cdot 0.1 \right| + \left| \frac{4 \cdot 1.52 \cdot 2}{3.1^3} \cdot 0.1 \right| =$$

$$= |0.0193| + |0.0201| + |0.3922|$$

השגיאה המסתכמת בגין השגיאה במדידת המשתנה d גדולה בסדר גודל מהאחרות, ולכן נדרש מכשיר מדויק יותר למדידת משתנה זה, ולא – בטלות השגיאות המצטברות האחרות שבגין המשתנים האחרים, וזו תהא שגיאת המדידה.

בדוגמה שלנו הוחלף המכשיר לאחר, המדויק פי 10. שגיאות המדידה

המצטברות תהיינה עתה :

$$dR = |0.0193| + |0.0201| + |0.0392|$$

$$.dR = 0.0786 \quad \text{וסכומן יהא:}$$

אי לכך התוצר הסופי יהיה :

$$.R = 1.47 \pm 0.08 \text{ [\Omega]}$$

נספח א: חישוב שגיאות באמצעות נגזרות חלקיות

## נספח ב

### המעבדה הווירטואלית



#### 1. תכולת התקליטור

לספר זה מצורף תקליטור המכיל 6 לומדות: **ניוטון, גלילאו, רוטארי, גראבי, וקטורי ופוטנציאל**. הלומדות מציגות הדמיות אינטראקטיביות של ניסויים ומעבדות הנלמדים בקורס פיזיקה בסיסי. כל לומדה בנויה כרצף הדמיות מודרכות, וכל הדמיה מציגה מעבדת חקר, שבה מגלה התלמיד פן מסוים של התופעה הנלמדת. בניסוי הבא מוצע לתלמיד לחקור פן אחר של הניסוי, וכך הלאה, עד שכל היבטי הניסוי נחקרים ונלמדים תוך כדי חקירה.

בסוף כל נושא מוצג לתלמיד "ניסוי חופשי", שבו אפשר לקבוע את כל הפרמטרים באופן בלתי תלוי, ולחקור את כל הקשרים של הניסוי ומאפייניו. הלומדות מכילות מבחן, המציג בעיות חישוב, וכן "מבחן מעבדה", שבו אמור התלמיד לקבוע את משתני הניסוי, שיובילו לתוצאה הנדרשת. כל השאלות במבחנים וב"מבחן מעבדה" כוללות נתונים אקראיים, וכך ניתן לחזור על השאלות פעמים רבות.

#### 2. שילוב הלומדות במהלך הלימוד

הלומדות מתאימות הן להצגה בכיתה על-ידי המורה במהלך שיעור פרונטלי הן לשימוש התלמידים בביתם.

אופן השימוש בלומדות בכיתה מתואר ב"מדריך למורה", ואילו את ההמלצות לתלמיד אפשר לסכם כדלקמן:

א. כל לומדה מכילה כמה נושאים המופיעים ב**תפריט הראשי**, הנפתח לאחר הפעלתה. לאחר שבוחרים את נושא הלימוד העיקרי, מתגלה **תפריט משני**, המפרט את הנושא לכמה תת-נושאים. בחרו בסעיף המתאים, והיכנסו לתהליך הלימוד והחקירה.

**נספח ב: המעבדה הווירטואלית**



ב. מומלץ לעבור על כל הפעולות המתוארות בחלון העליון של המסך: **שאלה, ניסוי חקר, מבחן מעבדה או שאלה חישובית** – גם אם נראה לכם שהיא פשוטה ויודעים אתם את התשובה או את התוצאה.

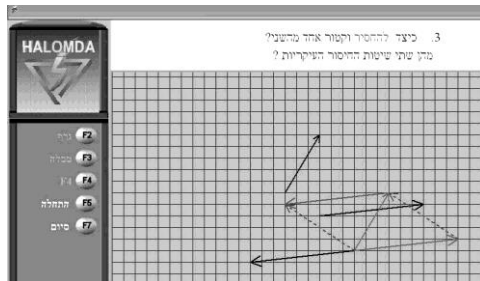
**תמונה אחת שווה אלף מילים: במקרים רבים יעילה הדמיה אינטראקטיבית אחת לא פחות מהניסוי האמיתי, ובשילוב עם הסברים – אף יותר!**

ג. מקשי ההפעלה של כל לומדה מרוכזים בחלון מיוחד בצד שמאל של המסך עם סימון בולט של הפעולה הקשורה בכל מקש. פעלו על-פי ההדרכה המופיעה בחלון ההדרכה או על-פי המקשים המסומנים כמומלצים – ותוכלו להתרכז בתוכן הלומדה, ולא באופן הפעלתה.

### 3. תוכני הלומדות

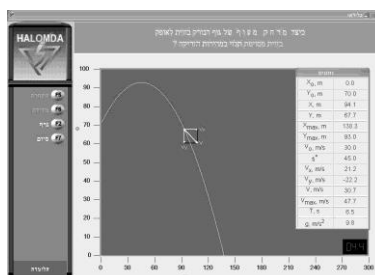
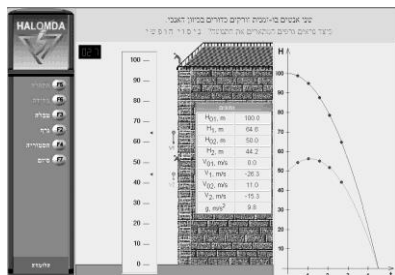
#### וקטורי

**תורת הווקטורים: הגישה הגיאומטרית והאלגברית, חיבור, חיסור ומכפלה של וקטורים, היטלים וקואורדינטות.**



הלומדה מאפשרת המחשה, לימוד אינטראקטיבי ותרגול בנושא החשוב במיוחד במהלך לימודי המכניקה (4S, 5, 6, 8, 12, 21), אלקטרוסטטיקה (93S, 94) ואלקטרומגנטיות (ספר הלימוד פיזיקה – 11).

#### גלילאו



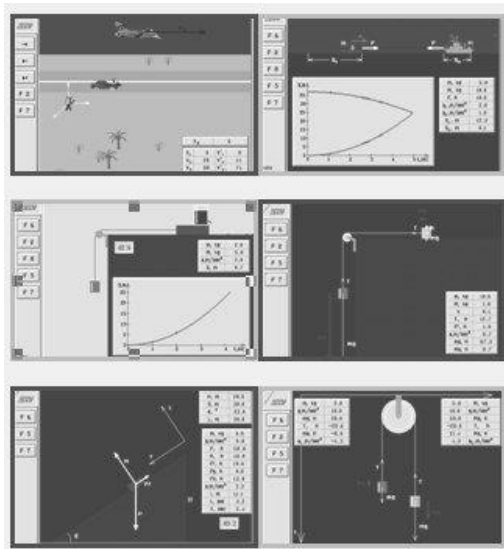
### נספח ב: המעבדה הווירטואלית

**יסודות המכניקה א : נפילה חופשית, מפגש שני גופים, זריקה אופקית, זריקה משופעת.**

הלומדה עוסקת בכל ההיבטים של תנועה בשדה הכובד בקרבת פני הקרקע, ומאפשרת לימוד באמצעות חקירה מודרכת ואינטראקטיבית של התופעות הקשורות בנפילה ובזריקת גופים, המתוארים בפרק 1, §17 ו-18.

**ניוטון**

**יסודות המכניקה ב**

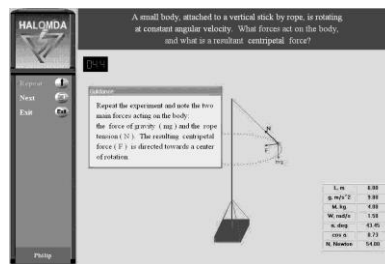
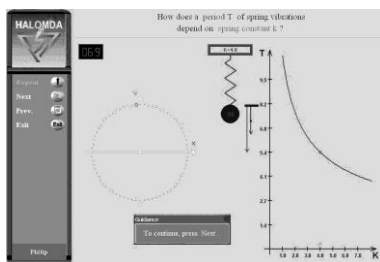


**חוקי ניוטון, מערכות ייחוס, מערכות מכניות בסיסיות, גלישה במישור משופע.**

לומדה זו מקיפה נושאי מכניקה רבים, הנלמדים בפרק 3 (§24, 26, 27, 28, 30) ובפרק 4 (§38, 39), ומהווה אבן דרך מרכזית בלימודי המכניקה.

**רוטארי**

**יסודות המכניקה ג : תנועה מעגלית, מטוטלת קונית, תנועה הרמונית, תנודות הרמוניות של קפיץ ומטוטלת מתמטית.**

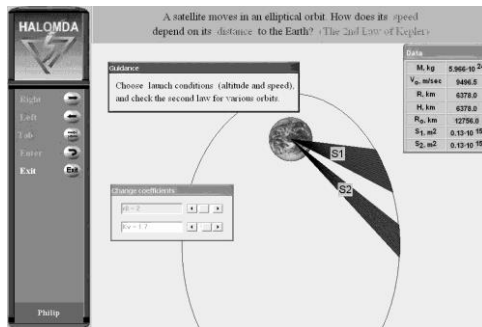


**נספח ב: המעבדה הווירטואלית**

רוב הנושאים המוצגים בלומדה זו מתוארים בספר לימוד פיזיקה – 11, אולם חלק מהם מופיע גם בספר זה: פרק 1 (19S), פרק 2 (21S), פרק 4 (36S, 37).

## נראבי

### משקל וכובד, תנועת ירח, שיגור לוויינים, חוקי קפלר.



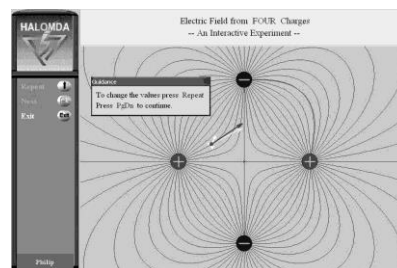
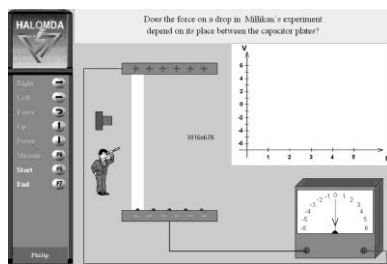
הנושאים המופיעים בלומדה זו נלמדים בספר זה בפרק 4 (35S, 32, 33, 34, 34א). את הניסויים והתופעות הנלמדים בלומדה זו לא ניתן להעביר בכיתה, ולכן ההדמיות הן כלי ההמחשה היחיד האפשרי, המלווה את לימוד כוחות הגרביטציה והתופעות הקשורות בהם.

## פוטנציאל

**יסודות תורת החשמל: אלקטרוסקופ (טעינה במגע, הארקה, השראה אלקטרוסטטית, ניסוי מיליקן, חוק קולון, קווי שדה של מספר מטענים, עבודה ופוטנציאל.**

לומדה זאת מכסה את מרבית הנושאים הנלמדים בפרק 14 (אלקטרוסטטיקה): 87S, 89, 92, 93, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 100.

הלומדה מכילה הן את הדמיות ההמחשה (השראה אלקטרוסטטית, הארקה וכד') הן את ההדמיות הממחישות קשרים בין ערכים פיזיקליים שונים (כמו הקשר בין עוצמת השדה להפרש הפוטנציאלים ועוד).



נספח ב: המעבדה הווירטואלית