

יסודות האלקטרודינמיקה

§85 מהי אלקטרודינמיקה?

נתחיל בפרק חדש של הפיזיקה, המכונה **אלקטרודינמיקה**. ידובר בו בתהליכים, המתרחשים עקב תנועה ופעולה הדדית של חלקיקים, הטעונים במטענים חשמליים. סוג פעולת גומלין זו מכונה **אלקטרומגנטיות**. חקירת מהותם של תהליכים אלה תביא אותנו לאחד המושגים הבסיסיים בפיזיקה: **השדה האלקטרומגנטי**.

אלקטרודינמיקה היא מדע של תכונות ושל חוקי ההתנהגות של סוג תווך מיוחד: השדה האלקטרומגנטי. באמצעותו מתרחשות פעולות הגומלין בין גופים או בין חלקיקים הטעונים במטען חשמלי.

בין ארבעת סוגי הכוחות הידועים למדע – כבידה, אלקטרומגנטיות, כוחות גרעיניים והכוחות החלשים¹ - תופסים הכוחות האלקטרומגנטיים מקום ראשון במגוון התופעות הפיזיקליות. לעתים קרובות ביותר אנו נתקלים בחיי יומיום ובטכנולוגיה בסוגים שונים של כוחות אלקטרומגנטיים: כוחות אלסטיים, כוחות חיכוך, כוח השרירים ועוד.

הכוחות האלקטרומגנטיים מאפשרים לכם לראות את הספר שאתם קוראים בו, מכיוון שאור הוא אחת מצורותיו של השדה האלקטרומגנטי. החיים עצמם היו בלתי אפשריים ללא כוחות אלה. יצורים חיים יכולים להתקיים במצב העדר משקל – כפי שהוכח בטיסות חלל, כאשר כוחות הגרביטציה אינם משפיעים על פעילות החיים; אולם אילו היתה פעילות הכוחות האלקטרומגנטיים נפסקת לרגע קט, היו החיים נעלמים מיד.

לכוחות האלקטרומגנטיים תפקיד חשוב הן במערכות הטבע הקטנות ביותר, כבגרעיני האטומים, הן בפעולות בין גופים קוסמיים: הכוחות החזקים והחלשים שבאטום פועלים רק בקני-מידה קטנים ביותר,² וכוחות הגרביטציה – רק בקני-מידה קוסמיים (לפחות אחד הגופים חייב להיות בעל ממדים קוסמיים).

¹ הכוחות החלשים גורמים להיפוכם של חלקיקי יסוד אלה לאחרים.
² המרחקים, שבהם פועלים כוחות חזקים, הם בסדר גודל של 10^{-12} cm.
הכוחות החלשים פועלים במרחקים קצרים עוד יותר: הם לא עולים על 10^{-16} cm.

מבנה קליפת האטום, הקשרים בין האטומים במולקולות (הכוחות הכימיים) והתמצקות מוצקים – כל אלה מתרחשים וקיימים הודות לכוחות האלקטרומגנטיים. קשה מאוד – למעשה כמעט בלתי אפשרי – לציין תופעה שאינה קשורה בפעולות הכוחות האלקטרומגנטיים.

שרשרת ארוכה של מחקרים מתוכננים וגילויים באקראי – החל בגילוי תכונת הענבר למשוך אליו חפצים קלים לאחר שפשופו בצמר – הקדימו את השערתו של המדען האנגלי ג'יימס קלארק מַקְסוּוֹל לגבי יצירת שדה מגנטי על-ידי שדה חשמלי משתנה. רק במחצית השנייה של המאה ה-19, לאחר הולדתה של האלקטרודינמיקה, הורחב השימוש בתופעות האלקטרומגנטיות. המצאת הרדיו על-ידי מַרְקוֹנִי (1874–1937) ופופוב (1859–1906) היא אחד היישומים החשובים של התורה החדשה.

לראשונה בהיסטוריה קדם בהתפתחות האלקטרודינמיקה מחקר מדעי ליישומים טכנולוגיים. לעומת מכונת הקיטור, שנבנתה זמן רב לפני שהושלמה תורת התרמודינמיקה, התאפשרו בניית מנוע החשמל או מקלט הרדיו רק לאחר גילוי חוקי האלקטרודינמיקה ופיתוחם.

היישומים האינסופיים של התופעות האלקטרומגנטיות שינו את חיי האנשים בכל העולם; לא ניתן לדמיין את האנושות בת-זמננו ללא זרם החשמל, למשל. שקעי החשמל בקירות בתינו מהווים "סביבת קיום" ייחודית לאדם; כה התרגלנו אליה, שהפסקנו להתפעל מיכולותיה הבלתי מוגבלות.

משימתנו היא ללמוד את החוקים הבסיסיים של התופעות האלקטרומגנטיות, ולהכיר את השיטות העיקריות להפקת אנרגיית החשמל ואת שימושיה בחיי היומיום.

פרק 14 אלקטרוסטטיקה

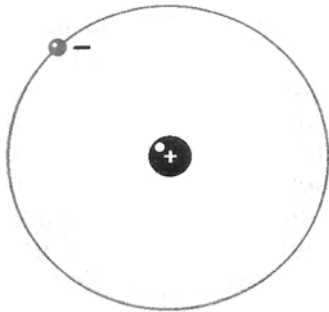
נבדוק תחילה את המקרה הפשוט ביותר של גופים טעונים הנמצאים במנוחה. חלק זה של האלקטרודינמיקה, העוסק בלימוד הגופים הטעונים הנייחים, מכונה אלקטרוסטטיקה.

§86 המטען החשמלי וחלקיקי היסוד

פעמים רבות פגשתם במושגים: **חשמל, מטען חשמלי, זרם חשמל** והסתגלתם לקבלם מבלי לחקור לפרטם. נסו להשיב לשאלה: "מהו מטען חשמלי?" ותיווכחו שאין זה כה פשוט: **מטען חשמלי** הוא מושג בסיסי, ראשוני, ולא ניתן להסבירו באמצעות מושגי יסוד בסיסיים ופשוטים יותר.

נשתדל תחילה לברר למה מתכוונים כאשר אומרים: "גוף או חלקיק נושא מטען חשמלי".

אתם יודעים כבר שכל הגופים בנויים מחלקיקים זעירים שאינם נחלקים לפשוטים יותר, ולכן הם מכונים **חלקיקי יסוד**. לכל חלקיקי היסוד מסה, ולכן הם נמשכים זה לזה מפאת כוח הכבידה העולמי. עם הגדלת המרחק בין החלקיקים הולך כוח הכבידה וקטן ביחס הפוך לריבוע המרחק ביניהם. רוב חלקיקי היסוד יכולים לפעול זה על זה בכוח **שונה** מכוח הכבידה. גם כוח זה הולך וקטן ביחס הפוך לריבוע המרחק שביניהם, אולם הוא גדול אלפי מונים מכוח הכבידה. כך, למשל, באטום המימן, המתואר באופן סכמטי בציור 172, נמשך האלקטרון לגרעין (לפרוטון) בכוח, הגדול פי 10^{39} מכוח משיכת הכבידה שביניהם.



ציור 172

אם חלקיקים פועלים זה על זה בכוחות התלויים במרחק, ככוחות הכבידה – אולם גדולים מכוחות הכבידה אלפי מונים – טוענים **שחלקיקים אלה נושאים מטען חשמלי**, והחלקיקים עצמם מכונים **טעונים**. קיימים חלקיקים ללא מטען חשמלי, אולם לא קיים מטען חשמלי ללא חלקיק.

הפעולות בין חלקיקים טעונים נושאות אופי אלקטרומגנטי, והמטען החשמלי – הוא שקובע את עוצמת הפעולות האלקטרומגנטיות; בדומה למסה, הקובעת את עוצמת הפעולות הגרביטציוניות.

המטען החשמלי של חלקיק אינו מנגנון מיוחד בתוך החלקיק, שאפשר להוציאו ממנו, לפרקו לגורמים ולהרכיבו מחדש. "קיום" המטען החשמלי באלקטרון

אלקטרומגנטיות

ובחלקיקים אחרים מעיד על קיום כוחות הדדיים בין החלקיקים הטעונים. עם זאת אין לנו יודעים דבר על המטען, אלא על החוקים הפיזיקליים של כוחות אלה. חוקים אלה אינם פשוטים, אי-אפשר להציגם בכמה מילים, ולכן אי-אפשר להגדיר באופן תמציתי וברור את המושג **מטען חשמלי**.

שני סימנים למטען החשמלי

לכל הגופים יש מסה, ולכן הם נמשכים זה לזה. כך גם גופים טעונים: הם יכולים למשוך זה את זה, אך גם לדחות זה את זה. עובדה חשובה זו, המוכרת לכם, מעידה שבטבע יש חלקיקים בעלי מטענים חשמליים מנוגדים; ושחלקיקים הנושאים מטענים זהים נדחים זה מזה, ובעלי מטענים נגדיים נמשכים זה לזה.

המטען של חלקיקי היסוד, המרכיבים את כל גרעיני האטומים, ה**פרוטונים**, מכונה **חיובי**, והמטען של ה**אלקטרונים**, הסובבים סביב הגרעין, מכונה **שלילי**. אין הבדלים פנימיים בין מטענים חיוביים לשליליים. אילו היו סימני המטענים של החלקיקים מתחלפים ביניהם, לא היה משתנה כלל אופיין של הפעולות האלקטרומגנטיות.

המטען האלמנטרי

מלבד האלקטרונים והפרוטונים יש עוד כמה סוגים של חלקיקי יסוד טעונים; אולם רק לאלקטרונים ולפרוטונים "אורך חיים" אינסופי במצב חופשי, ואילו יתר חלקיקי היסוד חיים פחות ממיליונית השנייה. הם נוצרים בהתנגשויות של חלקיקי יסוד מהירים, ולאחר פרק זמן קצר מאוד מתפרקים לחלקיקים אחרים (אותם תכירו בהמשך לימודיכם).

לחלקיקים חסרי מטען חשמלי שייך ה**נויטרון**. מסתו קרובה מאוד למסת הפרוטון. הנויטרונים והפרוטונים מרכיבים את גרעין האטום.

כפי שמראים כל הניסויים, אם חלקיק נושא מטען, גודלו מוגדר היטב.

קיים מטען מזערי, המכונה **אלמנטרי**, אותו נושאים כל חלקיקי היסוד הטעונים. אם שונים המטענים של חלקיקי היסוד, הרי זה בסימנם בלבד. לא ניתן להוציא חלק ממטען החלקיק. כל המידע על מטענים חשמליים מתקבל מהניסויים.



1. אילו כוחות בין הגופים נקראים אלקטרומגנטיים?
2. מהו המטען האלמנטרי?
3. מנו חלקיקי יסוד הטעונים חיובית והטעונים שלילית.

§87 גופים טעונים ושיטות טעינה

כיצד נטענים גופים מקרוסקופיים במטעו חשמלי? על כך ידובר בסעיף זה.

תפקידם של הכוחות האלקטרומגנטיים בטבע עצום ורב, משום שכל הגופים מורכבים מחלקיקים טעונים. גם מרכיבי האטום – האלקטרונים והגרעין – בעלי מטען חשמלי.

פעולת הכוחות האלקטרומגנטיים בין הגופים אינה נחשפת למתבונן, מכיוון שבמצב רגיל הגופים נייטרליים מבחינה חשמלית. גם אטום של כל יסוד הוא נייטרלי, מכיוון שמספר האלקטרונים שבו שווה למספר הפרוטונים שבגרעין. החלקיקים הטעונים חיובית ושלילית קשורים ביניהם באמצעות כוחות אלקטרומגנטיים, ומהווים מערכות נייטרליות מבחינה חשמלית.

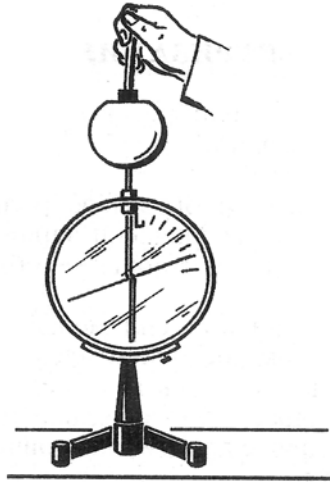
גוף מקרוסקופי יהיה טעון חשמלית, אם יכיל מספר עודף של חלקיקי יסוד טעונים: גוף הטעון שלילית הוא תוצאה של עודף אלקטרונים על כמות הפרוטונים שבו, וגוף הטעון חיובית הוא תוצאה של חוסר אלקטרונים לעומת כמות הפרוטונים שבו.

על מנת ליצור גוף מקרוסקופי טעון, כלומר, **לטעון** אותו, יש לנתק חלק מהמטען השלילי מהמטען החיובי הקשור אליו. זאת ניתן לעשות באמצעות שפשוף: אם נעביר מסרק בשֵׁעָר יבש, יעבור חלק קטן מהמטענים – הזריזים ביותר, האלקטרונים – מהשֵׁעָר למסרק ויטען אותו במטען שלילי; ואילו השֵׁעָר יישאר טעון חיובית.

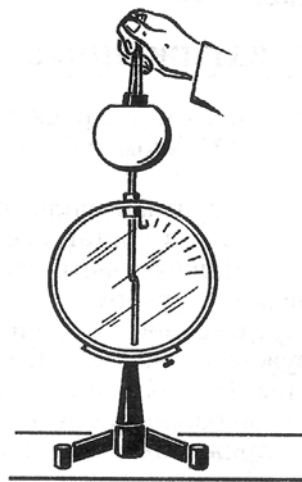
שוויון המטענים בתהליך הטעינה

באמצעות ניסוי ניתן להוכיח, שכתוצאה מטעינה בשפשוף נטענים שני הגופים במטענים המנוגדים בסימנם ושווים בגודלם.

נשתמש באלקטרוסקופ שעל קצה המוט המרכזי שבו מותקן כדור חלול, שפתח מצוי בקצהו העליון, ובשתי לוחיות בעלות ידיות ארוכות: לוחית אחת מאבזניט, והאחרת מפרספקט. תוך כדי שפשוף הלוחיות זו בזו הן נטענות. נכניס את האחת לתוך הכדור החלול בלי לגעת בדופן הכדור. אם הלוחית טעונה חיובית, חלק מהאלקטרונים שבמחוג המכשיר ובמוט המרכזי שלו יימשך אל הלוחית ויתרכזו בחלק הפנימי של דופן הכדור. המחוג יישאר טעון חיובית, ויידחה מהמוט המרכזי (ציור 173א). נוציא את הלוחית הראשונה ונכניס לתוך הכדור את השנייה, ואז יידחו מהלוח האלקטרונים שבכדור ובמוט המרכזי וינועו לעבר המחוג. עודף האלקטרונים במחוג יגרום לסטייתו לאותה זווית כמו בניסוי הראשון. אם נכניס לחלל הכדור את שתי הלוחיות יחדיו, לא נגלה סטיית מחוג כלל (ציור 173ב). ניסוי זה מוכיח שמטעני הלוחיות שווים בגודלם ומנוגדים בסימנם.



ציור 173א



ציור 173ב

טעינת הגופים בטכנולוגיה ובחיי היומיום

טעינה משמעותית מתרחשת בשפשוף בדים סינתטיים: הסרת חולצת ניילון באוויר יבש מתלווה בפצפוצים, האופייניים לפריקת מטענים בין שני משטחים טעונים. בתופעות מסוג זה יש להתחשב בתעשייה: כך נטענים חוטי טווייה במפעל בד בעקבות השפשוף, נמשכים לכישורים ולסלילי המכונות ונקרעים. חוטי הטווייה הטעונים מושכים אבק ומתלכלכים, ולכן נאלצים להשתמש באמצעים מיוחדים כנגד טעינת החוטים.

גוף מקרוסקופי טעון חשמלית, אם הוא מכיל עודף חלקיקי יסוד בעלי מטען מסוג אחד. מטען שלילי הוא תוצאה של עודף אלקטרונים לעומת כמות הפרוטונים, ומטען חיובי נוצר בעקבות חוסר אלקטרונים לעומת כמות הפרוטונים.

?

1. מנו דוגמאות של תופעות מחיי היומיום, הנגרמות עקב טעינת גופים.

2. במשאלות המובילות דלק קושרים למכל הדלק שרשרת ממתכת, והיא

נוגעת באדמה. מדוע?

§88 חוק שימור המטען החשמלי

כידוע לכם, נשמרת מסת הגופים. נשמר גם המטען החשמלי – דווקא המטען, ולא מספר החלקיקים הטעונים.

הניסוי בטעינת הלוחיות מוכיח, שבעקבות הטעינה בשפשוף מתרחשת חלוקה מחדש של מטעני הגופים, שבמצבם ההתחלתי היו נייטרליים. חלק קטן מהאלקטרונים עובר מגוף אחד לאחר; בתהליך זה אין נבראים חלקיקים טעונים חדשים, ולא נעלמים החלקיקים הטעונים שהיו קיימים.

במהלך טעינת הגופים מתקיים **חוק שימור המטען החשמלי**. חוק זה מתקיים **במערכת סגורה**: חלקיקים טעונים לא נכנסים למערכת מבחוץ, ולא יוצאים אל מחוץ למערכת; **במערכת סגורה נשאר הסכום האלגברי של מטעני כל החלקיקים קבוע**. אם נסמן את מטעני החלקיקים באמצעות q_1, q_2 וכו', יתקיים:

$$(14.1) \quad q_1 + q_2 + q_3 + \dots + q_n = \text{const}$$

לחוק שימור המטען משמעות עמוקה: אם מספר חלקיקי היסוד הטעונים אינו משתנה, החוק כמעט מובן מאליו; אולם חלקיקי יסוד עשויים להפוך את סימנם, להיוולד ולהיעלם, ו"להעניק חיים" לחלקיקים חדשים. בכל המקרים הללו נוצרים החלקיקים הטעונים בזוגות ובמטענים השווים בגודלם ומנוגדים בסימנם; כך גם נעלמים הם בזוגות, כאשר הם הופכים לחלקיקים נייטרליים. בכל המקרים סכום המטענים נשאר ללא שינוי.

קיומו של חוק שימור המטען מוכח מתצפיות במספר עצום של גלגולים של חלקיקי היסוד. חוק זה מבטא את אחת התכונות הבסיסיות ביותר של המטען החשמלי, אך פשרו אינו ידוע עד היום.

ערכו של המטען החשמלי ביקום נשמר. קרוב לוודאי שהמטען הכללי של היקום שווה לאפס, כלומר מספר חלקיקי היסוד החיוביים שווה למספר חלקיקי היסוד השליליים.

?

1. מהו חוק שימור המטען החשמלי ?
2. הביאו דוגמאות של תופעות, שבהן ניתן להיווכח בשימור המטען החשמלי.

§89 החוק הבסיסי של האלקטרוסטטיקה: חוק קולון

נתחיל ללמוד את החוקים הכמותיים של התופעות האלקטרומגנטיות. החוק הבסיסי של האלקטרוסטטיקה הוא חוק הפעולה ההדדית שבין שני גופים נקודתיים טעונים.

החוק הבסיסי של האלקטרוסטטיקה נקבע באופן ניסויי על-ידי שארל קולון בשנת 1785, והוא נושא את שמו.

בטבע לא קיימים גופים נקודתיים, אולם אם המרחק בין הגופים (הטעונים) גדול בהרבה מממדיהם, אין צורת הגופים וגודלם משפיעים משמעותית על הכוחות הפועלים ביניהם. במקרה זה אפשר לתאר את הגופים כנקודתיים. ניזכר שגם חוק הכבידה העולמית נוסח עבור גופים נקודתיים.

הכוח, הפועל בין הגופים הטעונים, תלוי בתכונות התווך שבו הם נמצאים. בינתיים נלמד על התופעות בריק. הניסוי מראה, שהשפעת האוויר על הכוחות החשמליים מזערית, ובפועל ערכם שווה לאלה שבריק.

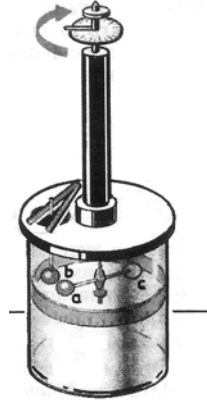


שארל אוגיסטן קולון (1736 – 1806)

מדען צרפתי דגול בזכות עבודותיו בחשמל ובמגנטיות ומחקריו בתחום כוחות החיכוך. בנוסף למחקריו ביחס לכוחות, הפועלים בין גופים טעונים, חקר קולון גם את הכוחות הפועלים בין קטבים של מגנטים ארוכים.

אלקטרוסטטיקה

ניסוי קולון



ציור 174

גילוי חוק ההשפעה ההדדית בין מטענים חשמליים התאפשר הודות לעובדה שהכוחות החשמליים חזקים וניכרים למתבונן. לא נדרש להשתמש במכשור רגיש במיוחד, כפי שנחוץ היה בחקר חוק הכבידה העולמית; בעזרת מכשיר, המכונה **מאזני פיתול**, התאפשר לקבוע כיצד פועלים גופים טעונים נייחים זה על זה.

מאזני פיתול מורכבים ממוט זכוכית, התלוי בקצה תיל אלסטי דק (ציור 174). בקצה האחד של

מוט אופקי זה מקובע כדור מתכת קטן a, ובקצהו האחר – משקולת נגדית זהה c. עוד כדור מתכת, b, מורכב באופן קשיח על המוט, הקשור למכסה המכשיר.

לכדורים a ו-b הועברו מטענים בעלי אותו סימן. הם דחו זה את זה, והחוט האלסטי התפתל לזווית מסוימת מפאת המומנט, המופעל בקצהו באמצעות מוט הזכוכית. לפי שיעור הזווית אומדים את הכוח הפועל בין הכדורים הטעונים.

מאזני הפיתול אפשרו ללמוד את תלות הכוח, הפועל בין כדורים טעונים, בגודל המטענים ובמרחק ביניהם. בתקופה ההיא ידעו כבר למדוד כוח ומרחק, והקושי היחיד שנותר היה שיעורו של המטען, שכן עבורו לא היו קיימות אז יחידות פיזיקליות. קולון מצא שיטה פשוטה לשינוי כמות המטען של כל אחד מהכדורים פי 2, פי 4 ופי יותר פעמים על-ידי חיבורו בכדורים זהים שאינם טעונים. לאחר החיבור היה המטען נחלק בין הכדורים באופן שווה, והמטען הנחקר נכפל ביחס ידוע. הכוח החדש עבור המטען החדש היה נמדד במישרין באמצעות מאזני הפיתול.

חוק קולון

ניסוי קולון הביא לגילוי חוק, הדומה באופן מדהים לחוק הכבידה העולמית: **הכוח, הפועל בריק בין שני מטענים נקודתיים נייחים, נמצא ביחס ישר למכפלת ערכי המטענים, וביחס הפוך לריבוע המרחק ביניהם.** כוח זה מכונה **כוח קולון**.

אם נסמן את ערכי המטענים באמצעות $|q_1|$ ו- $|q_2|$, ואת המרחק ביניהם ב- r ,

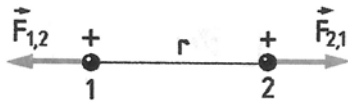
ניתן לרשום את חוק קולון בצורה:

אלקטרוסטטיקה

$$(14.2) \quad F = k \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{r^2}$$

כאשר: k – מקדם הפרופורציונליות, השווה לכוח הפועל בין שני מטענים, שערכם יחידת מטען והנמצאים במרחק יחידת מרחק זה מזה. ערכו של k תלוי בבחירת מערכת היחידות הפיזיקליות.

פגשנו אפוא בתבנית (14.2) הזוהה לזו של חוק הכבידה העולמית; אך במקום המטענים מופיעות בו המסות, ובתפקידו של המקדם k מופיע קבוע הגרביטציה.



ציור 175

קל לנסות ולגלות ששני כדורים טעונים, התלויים בחוטים, נמשכים זה לזה או נדחים זה מזה. מכך נלמד שהכוחות, הפועלים בין שני

גופים טעונים, נקודתיים ונייחים, מכוונים לאורך הקו המחבר בין הגופים (ציור 175). כוחות מסוג זה מכוונים **כוחות מרכזיים**. בהתאם לחוק השלישי של ניוטון:

$$\vec{F}_{1,2} = -\vec{F}_{2,1}$$

גילוי של חוק קולון הוא הצעד המעשי הראשון בלימוד תכונות המטען החשמלי. גופים טעונים קטנים וחלקיקי יסוד פועלים זה על זה בהתאם לחוק קולון.

?

1. במה דומים ובמה שונים חוק הכבידה העולמית וחוק קולון?
2. מתי ניתן לתאר את המטען החשמלי כמטען נקודתי?

§90 יחידת המטען החשמלי

הוגדר גודל פיזיקלי חדש – **המטען החשמלי** – וכעת יש לבחור את היחידה הפיזיקלית של גודל זה. בחירה זו עשויה היתה להיות שרירותית, כבחירה של יחידות פיזיקליות ראשוניות אחרות. השיקול הקובע בבחירת היחידה הפיזיקלית הוא נוחות השימוש בה.

יצירת תקן מקרוסקופי של יחידת מטען חשמלי בהקבלה לקביעת יחידת המסה, הקילוגרם, היא משימה בלתי אפשרית עקב זליגת המטען. טבעי היה לבחור ביחידת המטען של אלקטרון כיחידת המטען – כפי שאכן נעשה הדבר בפיזיקה אטומית –

אלקטרוסטטיקה

אולם מטען זה קטן מדי, ולכן לא תמיד היה נוח להשתמש בו כיחידת מטען מקרוסקופית.

יחידת המטען קולון

במערכת היחידות הבינלאומית SI יחידת המטען איננה יחידה ראשונית, אלא משנית, ואין בעבורה תקן. עם המטר, השנייה והקילוגרם מוגדרת במערכת SI יחידה פיזיקלית ראשונית: יחידת הזרם **אמפר**. הערך התקני של האמפר מוגדר באמצעות הכוחות הפועלים בין זרמים חשמליים.

את יחידת המטען במערכת SI, **הקולון**, מגדירים באמצעות יחידת הזרם: **קולון אחד (1 C) הוא המטען, העובר בשנייה אחת דרך חתך המוליך, כאשר עוצמת הזרם 1 A.**

יחידות המקדם k בביטוי של חוק קולון ביחידות SI הן: $\frac{N \cdot m^2}{C^2}$, מכיוון שעל-פי הנוסחה (14.2):

$$(14.3) \quad k = \frac{Fr^2}{|q_1||q_2|}$$

כאשר יחידת הכוח היא ניוטון, יחידת המרחק היא מטר, ויחידת המטען היא קולון. את הערך המספרי של מקדם זה ניתן למדוד באופן ניסויי: יש למדוד את הכוח הפועל בין שני מטענים ידועים $|q_1|$ ו- $|q_2|$ הנמצאים במרחק נתון r , ואת הערכים האלה להציב בנוסחה (14.3). הערך המתקבל של k הוא:

$$(14.4) \quad k = 9 \cdot 10^9 \frac{N \cdot m^2}{C^2}$$

מטען ששיעורו 1 C גדול מאוד. הכוח הפועל בין שני מטענים, שכל אחד מהם בן 1 קולון, הנמצאים במרחק של 1 km זה מזה, שווה כמעט לכוח, שבו מושך כדור הארץ מסה של 1 T הנמצאת על-פניו. לא ניתן לטעון מטען ששיעורו 1 קולון בגוף קטן (אף בגודל של כמה מטרים מעוקבים), כי החלקיקים הטעונים ידחו זה את זה ולא יישארו על הגוף. אף לא קיימים בטבע כוחות אחרים, היכולים לקזז את כוחות קולון במקרה זה; אולם לא קשה להניע מטען, ששיעורו 1 קולון, הכלוא במוליך נייטרלי: הרי בנורת חשמל רגילה, שהספקה 100 וואט והנמצאת תחת מתח של 127

וולט, זורם זרם בעוצמה הקרובה לאמפר אחד. במצב זה עובר דרך חתך חוט הלהט בשנייה אחת מטען, השווה בערך לקולון אחד.

המטען הקטן ביותר שנמצא בטבע הוא המטען של חלקיקי היסוד. במערכת היחידות SI גודל מטען זה הוא:

$$e = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C} \quad (14.5)$$

במערכת SI יחידת המטען היא קולון, והיא נקבעת באמצעות יחידת הזרם אמפר. המטען החשמלי הבסיסי הוא: $e = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$.

?

1. כיצד נקבעת יחידת המטען החשמלי?
2. מה גודלו של מטען הפרוטון?
3. למה שווה המקדם k של חוק קולון?

דוגמאות לפתרון תרגילים

בפתרון תרגילים בחוק קולון משתמשים באותן השיטות כמו במכניקה: יש להביא בחשבון את מגמתו של כוח קולון, התלוי בסימני המטענים של הגופים. בכמה תרגילים משתמשים גם בחוק שימור המטען ובעובדה, שכמות המטען המזערית היא מטען חלקיקי היסוד, השווה ל- $e = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$.

1. כמה אלקטרונים נמצאים בטיפת מים שמסתה $m = 0.003 \text{ g}$? מסת מולקולת

$$\text{המים } m_0 = 3 \cdot 10^{-23} \text{ g}$$

פתרון

מולקולת המים (H_2O) מכילה 10 אלקטרונים. בטיפת מים נמצאות

$$\frac{m}{m_0} = 10^{21} \text{ מולקולות, ובהתאם - } 10^{22} \text{ אלקטרונים.}$$

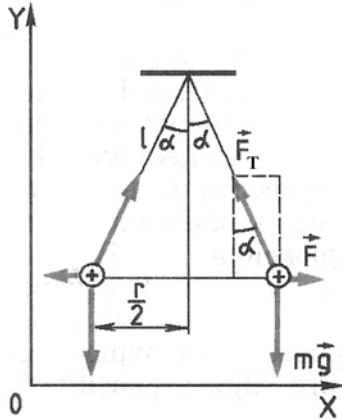
2. שני כדורים זהים תלויים על חוטים באורך $l = 2.0 \text{ m}$, הקשורים לנקודה אחת.

לאחר שטענו את הכדורים במטענים שווים $q = 2 \cdot 10^{-8} \text{ C}$, התרחקו הכדורים

למרחק $r = 16 \text{ cm}$. מצאו את מתיחות כל חוט.

אלקטרוסטטיקה

פתרון



ציור 176

על כל כדור פועלים שלושה כוחות: כוח כבידה \vec{F} , כוח מתיחות החוט \vec{F}_T וכוח קולון \vec{F} (ציור 176).

הכדור ניח, ולכן סכום היטלי הכוחות על הצירים Ox ו-Oy שווה לאפס. עבור סכום ההיטלים על ציר Ox צורת התנאי הזה היא:

$$F - F_T \sin \alpha + mg \cos 90^\circ = 0$$

מכיוון ש: $\sin \alpha = \frac{r}{2l}$ ו- $F = k \frac{q^2}{r^2}$, אזי:

$$F_T = \frac{F}{\sin \alpha} = \frac{F \cdot 2l}{r} = k \frac{q^2 \cdot 2l}{r^3} \approx 3.5 \cdot 10^{-3} \text{ N}$$

החוט מתוח בכוח השווה בערך ל- $3.5 \cdot 10^{-3} \text{ N}$.

מקבץ תרגילים 16

1. מקל זכוכית נטען חיובית לאחר שפשופו במשי. מצאו באופן ניסויי את סימנו של מטען עט העשוי מפלסטיק לאחר שפשופו בצמר.

2. מצאו את הכוח הפועל על האלקטרון בגרעין של מימן, אם ידוע שמרחק האלקטרון מהגרעין הוא $0.8 \cdot 10^{-8} \text{ cm}$.

3. פי כמה גדול כוח קולון, הפועל בין האלקטרון לבין הגרעין של אטום מימן, מכוח הגרביטציה הפועל ביניהם? מסת האלקטרון $m_e = 9.11 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$ ומסת הפרוטון $m_p = 1.67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$. קבוע הכבידה העולמי הוא:

$$G = 6.67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{kg}^2}$$

4. מהו שיעורו של הכוח, שהיה פועל בין שתי טיפות מים, שמסתן 0.03 g ושהמרחק ביניהן 1 ק"מ , אילו היו מעבירים מטיפה אחת לאחרת 1% מכל האלקטרונים הנמצאים בה?

אלקטרוסטטיקה

5. שני כדורים זהים נמצאים במרחק 40 ס"מ זה מזה. המטען של כדור אחד $9 \cdot 10^{-9} \text{ C}$, ושל האחר: $-2 \cdot 10^{-9} \text{ C}$. הביאו את הכדורים למגע, והרחיקו שוב למרחק הקודם. מצאו את הכוחות בין הכדורים לפני המגע ולאחריו.

6. שני מטענים נקודתיים, $1.0 \cdot 10^{-8} \text{ C}$ ו- $2.0 \cdot 10^{-8} \text{ C}$, מוחזקים במרחק 1 m בריק. על הקו המחבר ביניהם ובמרחק השווה מכל אחד מהם מצוי גוף קטן, הנושא מטען $-3 \cdot 10^{-9} \text{ C}$. מה גודלו של הכוח הפועל על כל גוף נושא מטען, ומהי מגמתו?

§91 פעולה מקרוב ומרחוק

חוק הפעולה ההדדית בין מטענים נייחים התגלה באופן ניסויי. נותרה פתוחה השאלה: כיצד מתבצעת פעולה זו? בפרק זה נבהיר את הסוגיה.

כשצופים אנו בפעולה של גוף אחד על אחר, הנמצא במרחק כלשהו ממנו, ולפני שמניחים שפעולה זו ישירה ובלתי אמצעית, רגילים אנו לברר תחילה: האם לא קיים קשר ממשי איזשהו בין הגופים: חוטים, מוטות וכדומה? אם קשרים אלה קיימים, מוסברת הפעולה בין הגופים באמצעות חוליות ביניים אלה. כך כאשר נהג מיניבוס פותח דלת באמצעות ידית, מתארכות חוליות המוט המקשר את הידית לדלת ואחרות מתקצרות, עד שנפתחת הדלת.

נהג האוטובוס פותח דלתות באמצעות מערכת פנאומטית, מבוססת אוויר דחוס, או באמצעות מערכת חשמלית, המפעילה את המנוע החשמלי.

בכל שלוש השיטות לפתיחת הדלת נמצא מכנה משותף: בין הנהג לבין הדלת קיים ערוץ קשר, שבכל נקודותיו מתרחשים תהליכים פיזיקליים. בעזרת תהליך זה, המתקדם מנקודה לנקודה לאורך ערוץ הקשר, מתבצעת העברת הפעולה; ההעברה לא מתרחשת באופן מיידי, אלא במהירות כזו או אחרת.

אם כן, את הפעולה שבין גופים, הנמצאים במרחק זה מזה, ניתן במקרים רבים להסביר בקיום חוליות ביניים המעבירות את הפעולה. גם באותם מקרים, שאין אנו מבחינים בתווך ואף לא באמצעי מתווך בין הגופים, נוטים אנו להניח את קיומם של חוליות הביניים מסוג כלשהו – שהרי אחרת נצטרך להתמודד עם הסוגיה: כיצד פועל גורם מתווך שאינו מצוי? מי שלא מכיר את תכונות האוויר עשוי לשער,

שמיתרי הקול של הדובר פועלים על אוזני השומע באמצעות תווך בלתי נראה, מיוחד ומסתורי; אולם אנו יודעים שניתן לעקוב אחר תהליך ההתקדמות גלי הקול, אף לחשב את מהירותם.

הרעיון שפעולה בין גופים, המרוחקים זה מזה, מתבצעת תמיד באמצעות חוליות ביניים (או התווך), המעבירים את הפעולה מנקודה לנקודה, מהווה את המהות של תורת הפעולה מקרוב.

מדענים רבים, המצדדים בתורה זאת, ניסו להסביר את כוחות הגרביטציה ואת הכוחות האלקטרומגנטיים באמצעות זרמים בלתי נראים, הנמצאים בין הפלנטות ובין המגנטים ובאטמוספרות בלתי נראות, העוטפות גופים טעוני חשמל. לעתים היו התיאוריות מעניינות מאוד, אולם לקו בעניין חשוב אחד: הן לא הוסיפו מאום למדע.

פעולה מרחוק

גם **ניוטון**, שניסח את חוק הכבידה העולמית, לא הציע הסבר לפעילותו. ההצלחות שבאו לאחר מכן בחקר מערכת השמש הסעירו את דמיון המדענים, והם התחילו לתמוך במחשבה שאין טעם לחפש את המתווכים, המעבירים את הפעולה מגוף אחד למשנהו.

כך נולדה תורת הפעולה הישירה מרחוק דרך הריק. בהתאם לתורה זו מועברת הפעולה מיידית למרחקים גדולים, וגופים יכולים "לחוש" את נוכחותם של גופים אחרים ללא כל תווך ביניהם. חסידי תורת הפעולה הישירה מרחוק לא נבוכו מהמחשבה, שגוף פועל היכן שאיננו קיים, כפי שמגנט או מוט טעון מושכים גופים ישירות דרך הריק; כוח המשיכה איננו נחלש משמעותית, אם נעטוף את המגנט בנייר או נניח אותו בתיבת עץ. יתרה מזאת; גם אם נראה לנו שהפעולה נגרמת עקב מגע ישיר, במציאות אין זה כך, כי גם במגע ההדוק ביותר נשארים מרווחים בין הגופים או בין חלקי אותו גוף: הרי משקולת התלויה על חוט לא קורעת אותו – אף שבין האטומים המרכיבים את החוט אין כלום. אם כן, **הפעולה מרחוק היא דרך הפעולה היחידה שפוגשים בה בכל מקום.**

השיקולים נגד תורת הפעולה מקרוב נתמכו בהצלחות של מצדדי תורת הפעולה מרחוק **כקולון וכאמפר**, שגילו את חוקי הכוחות הפועלים בין מטענים נעים לבין זרם חשמל.

אילו היה המדע מתפתח בערוץ מתמשך אחד, קרוב לוודאי שנצחון תומכי התורה של פעולה מרחוק היה מובטח מיידית; אולם במציאות דומה התפתחות המדע יותר לספירלה: לאחר "סיבוב" אחד של גיבוש תיאוריה חוזר המדע ושב לאותם רעיונות, אולם ברמה גבוהה יותר. כך בדיוק קרה בהתפתחות התורה המולקולרית: רעיון האטומים של **דמוקריטס** ניטש בזמנו על-ידי רוב המדענים, אך לאחר זמן רב נולד הרעיון מחדש בצורה מתמטית והוכח באופן ניסויי. כך קרה גם לתורה של הפעולה מקרוב: גילוי חוקי הכוחות, הפועלים בין המטענים הנעים לבין הזרמים, לא היה קשור לרעיון של הפעולה מרחוק, והחקירה הניסויית של הנושא לא הסתמכה על מודל מסוים של מנגנון העברת הכוחות. תחילה היה צורך במציאת הנוסח המתמטי של הכוחות, ואת טבעם (פעולה מקרוב או מרחוק) של הכוחות ניתן היה לברר מאוחר יותר.

בהתאם לתורת הפעולה מרחוק פועל גוף אחד על גוף אחר במישרין דרך ריק, ופעולה זו מועברת מיידית. תורת הפעולה מקרוב טוענת, שכל פעולה מתבצעת באמצעות מתווכים ומתקדמת במהירות סופית.

?

1. איזו תורה – של פעולה מרחוק או של פעולה מקרוב – נראית לכם

מושכת יותר? מדוע?

2. מהם הצדדים החזקים יותר של תורת הפעולה מרחוק לעומת

התורה של פעולה מקרוב?

§92 השדה החשמלי

לאחר מאבק ממושך ניצחה סופית תורת הפעולה מקרוב. נתאר בקצרה כיצד קרה הדבר, ונלמד על מהותו של השדה החשמלי.

הרעיונות של פאראדי

המפנה המכריע ברעיון הפעולה מקרוב החל במחקריו של המדען האנגלי **מייקל פאראדי** והסתיים במחקריו של המדען האנגלי **ג'יימס מקסוול**. על-פי תורת הפעולה מרחוק חש מטען אחד באופן בלתי אמצעי במטען האחר. בהעתקה של אחד מהמטענים – לדוגמה A (ציור 177) – משנה הכוח הפועל על המטען האחר B את ערכו באופן מידי. עם זאת אין מתרחשים שינויים כלשהם

אלקטרוסטטיקה

במטען B עצמו או בסביבתו.

בהתאם לרעיון של פאראדי, מטעני חשמל אינם פועלים זה על זה במישרין, אלא כל אחד מהם יוצר שדה חשמלי במרחב שמסביבו. שדהו של מטען אחד פועל על המטען האחר, ולהפך. השדה שיוצר המטען נחלש ככל שמתרחקים מהמטען, ממחולל השדה.

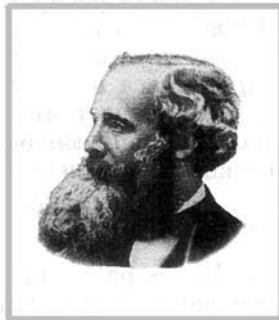


ציור 177

העלאת רעיון זה הביעה את בטחונו של פאראדי בכך, שפעולת גוף אחד על האחר דרך הריק בלתי אפשרית.

לא היו הוכחות לקיום השדה, כי לא ניתן היה להשיגן על-ידי חקירת הכוחות הפועלים בין מטענים נייחים. ההוכחות לקיום הפעולה מקרוב באה לאחר חקירת הפעולות ההדדיות שבין המטענים בתנועתם. תחילה הוכיחו את קיומם של השדות המשתנים בזמן, ורק לאחר מכן הגיעו למסקנה לגבי קיום שדה חשמלי של מטענים נייחים.

ג'יימס קלרק מקסוול (1831 – 1879)



מדען אנגלי, אבי תורת השדה האלקטרומגנטי. משוואות מקסוול לשדה אלקטרומגנטי מהוות את הבסיס לאלקטרודינמיקה כולה, בדומה לחוקי ניוטון, המהווים את הבסיס למכניקה הקלאסית. מקסוול היה גם אחד ממפתחי התורה המולקולרית של מבנה החומר. הוא הראשון שהביא למדע הפיזיקה את רעיון החוקים הסטטיסטיים, המבוססים על מושג ההסתברות המתמטית.

מייקל פאראדי (1791 – 1867)



מדען אנגלי, אבי התורה הכללית של התופעות האלקטרומגנטיות, שבהן מתוארות כל התופעות מנקודת מבט אחת משותפת. פאראדי היה הראשון שהשתמש במושגי השדה החשמלי והשדה המגנטי: "בעוד המתמטיקאים ראו את מוקדי הכוחות הפועלים מרחוק, ראה פאראדי את חוליות הביניים. הם ראו את המרחק והסתפקו במציאת חוק התפלגות הכוחות הפועלים על מטענים חשמליים – ופאראדי חיפש את מהות התופעות הממשיות המתרחשות בתוֹך", כתב ג' מקסוול.

אלקטרומגנטיקה

מהירות ההתקדמות של פעולות גומלין אלקטרומגנטיות

בהתבסס על הרעיונות של פאראדי הצליח **מקסוול** להוכיח באופן תיאורטי, שפעולות אלקטרומגנטיות מתקדמות במרחב במהירות סופית.

משמעות הדבר, שאם נזיז את מטען A (ציור 177), אומנם ישתנה הכוח הפועל על המטען B, אולם לא באותו רגע, אלא כעבור זמן מסוים:

$$(14.6) \quad t = \frac{AB}{c}$$

כאשר: AB – המרחק בין המטענים; c – מהירות ההתקדמות של פעולות אלקטרומגנטיות.

מקסוול מצא שמהירות זו שווה למהירות האור בריק, דהיינו 300,000 km/sec. השדה סביב המטען B ישתנה כעבור זמן t מאז שזז המטען A. מכאן המסקנה שבין המטענים בריק מתרחש תהליך, וכתוצאה ממנו מתקדמת הפעולה ההדדית שביניהם במהירות סופית.

קיום תהליך מסוים, המתרחש במרחב בין גופים הפועלים זה על זה והמתמשך זמן סופי – זה העיקר המבדיל בין תורת הפעולה מקרוב לבין תורת הפעולה מרחוק. כל הטיעונים האחרים לטובת מודל זה או אחר אינם יכולים להכריע. אכן, קשה לערוך ניסוי בהזזת המטענים לבדיקת השוויון (14.6) עקב הערך העצום של המהירות c, אולם כעת, לאחר המצאת הרדיו, כבר אין צורך בניסוי.

גלי רדיו

העברת מידע באמצעות גלים אלקטרומגנטיים מכונה **קשר רדיו**. כעת יכולים אתם לקרוא בעיתונים שגלי הרדיו מתחנת החלל, המתקרבת לכוכב נוגה, מגיעים לכדור הארץ כעבור 4 דקות בערך. ייתכן שהתחנה כבר נשרפה באטמוספירה של הפלנטה, אולם גלי הרדיו ששידרה ישוטטו בחלל עוד "זמן רב". כך מתגלה השדה האלקטרומגנטי כמהות ממשית המתקיימת באופן עצמאי.

מהו השדה חשמלי?

אנו יודעים ששדה חשמלי הוא ממשי: את תכונותיו אפשר לחקור באופן ניסויי; אולם איננו יכולים לומר ממה מורכב שדה זה. כאן אנו מגיעים לגבולות הנודע במדע.

בית מורכב מלבנים, חומרים אחרים מורכבים ממולקולות, מולקולות מורכבות מאטומים, והאטומים מורכבים מחלקיקי יסוד. איננו יודעים ממה מורכבים חלקיקי יסוד, וכך גם המצב עם השדה החשמלי: איננו מכירים בו חלקיק פשוט יותר. לכן לגבי טבעו של השדה החשמלי יכולים אנו לומר:

ראשית, השדה הוא ממשי. שנית, השדה הוא בעל תכונות מסוימות, והן שונות מתכונות אחרות בעולמנו.

אוסף תכונות מסוימות אלה מסייע בהבנת מהות השדה החשמלי: בחקירת השדה החשמלי אנו נתקלים בסוג תווך מיוחד, אשר התנועה בו אינה מציינת לחוקי המכניקה של ניוטון. גילוי השדה החשמלי הוביל לרעיון חדש בכל ההיסטוריה של המדע: קיימים בטבע סוגים שונים של תווכים, ולכל אחד מהם חוקים משלו.

התכונות הבסיסיות של השדה החשמלי

התכונה העיקרית של השדה החשמלי היא הפעלת כוח על מטענים חשמליים. על-פי פעולת השדה על המטען קובעים את קיומו של השדה ואת התפלגותו במרחב, ולומדים את כל תכונותיו.

השדה החשמלי של מטענים נייחים מכונה שדה אלקטרוסטטי. הוא אינו משתנה בזמן. השדה האלקטרוסטטי נוצר על-ידי מטענים חשמליים בלבד. הוא קיים במרחב מסביב למטענים אלה וקשור אליהם.

במהלך לימודי האלקטרודינמיקה נכיר תכונות חדשות של השדה החשמלי, וגם את תכונותיו של השדה המשתנה בזמן.

תכונות רבות של שדות קבועים ושדות משתנים הן זהות, אולם קיימים ביניהם גם הבדלים משמעותיים. כשנדבר על תכונות השדה החשמלי, נכנה אותו בפשטות: **שדה חשמלי.**

בהתאם לתורת הפעולה מקרוב מתבצעת הפעולה בין חלקיקים טעונים באמצעות השדה החשמלי. השדה החשמלי הוא סוג מיוחד של תווך, המתקיים באופן בלתי אמצעי. הוכחת הקיום של השדה החשמלי היא המהירות הסופית של התפשטות הפעולות האלקטרומגנטיות.

?

1. מה ההבדל בין תורת הפעולה מרחוק לבין תורת הפעולה מקרוב?

2. מהן התכונות העיקריות של השדה האלקטרוסטטי?

§93 עוצמת השדה החשמלי עקרון הסופרפוזיציה של שדות

לא די לטעון ששדה חשמלי קיים; יש להגדיר את המאפיין המספרי של השדה. לאחר מכן אפשר יהיה להשוות בין שדות חשמליים ולהמשיך לחקור את תכונותיהם.

עוצמת השדה החשמלי

שדה חשמלי מתגלה לפי הכוחות הפועלים על מטען. אפשר לומר שאנו יודעים הכול על השדה, אם נדע מהו הכוח הפועל על מטען, המצוי בכל נקודה בשדה. לכן יש להגדיר ערך אופייני לשדה, שידיעתו תאפשר לחשב את הכוח על מטען בשדה.

אם נציב באותה נקודת שדה מטענים קטנים ושונים ונמדוד את הכוחות הפועלים עליהם, יתברר שכוח, המופעל על המטען על-ידי השדה, נמצא ביחס ישר לגודל המטען. נניח שהשדה נוצר על-ידי מטען נקודתי q_1 . בהתאם לחוק קולון (14.2) הכוח הפועל על מטען אחר q_2 נמצא ביחס ישר לגודל המטען q_2 . מכאן שהיחס בין הכוח הפועל על מטען, הנמצא בנקודת שדה נתונה, לבין גודל המטען אינו תלוי בגודל המטען, ולכן יכול לשמש כערך המאפיין את השדה.

הערך הזה מכונה **עוצמת השדה החשמלי**. בדומה לכוח, עוצמת השדה היא ערך וקטורי, ומסמנים אותה באות \vec{E} . אם נסמן את המטען שהוכנס לשדה באות q במקום q_2 , תהיה עוצמת השדה:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q} \quad (14.7)$$

עוצמת השדה שווה ליחס בין הכוח הפועל על מטען נקודתי לבין גודל המטען.

מכאן נובע, שהכוח הפועל על המטען בשדה חשמלי שווה ל:

$$\vec{F} = q\vec{E} \quad (14.8)$$

הווקטור \vec{E} מכוון במגמת הכוח הפועל על מטען חיובי, ונגד מגמת הכוח הפועל על מטען שלילי.

עוצמת השדה של מטען נקודתי

נמצא את עוצמת השדה החשמלי הנוצר על-ידי מטען נקודתי q_0 . לפי חוק קולון,

יפעל מטען זה על מטען אחר בכוח השווה ל:

$$F = k \frac{|q_0||q|}{r^2}$$

הערך המוחלט של עוצמת השדה של מטען נקודתי q_0 במרחק r ממנו שווה:

$$E = \frac{F}{q} = k \cdot \frac{|q_0|}{r^2} \quad (14.9)$$

בכל נקודות השדה החשמלי מכוון וקטור עוצמת השדה לאורך הקו, המחבר

נקודה זו עם המטען (ציור 178).

עקרון הסופרפוזיציה (החפיפה) של השדות

לפי חוקי המכניקה, כאשר כמה כוחות

פועלים על הגוף, שווה הכוח השקול לסכום

וקטורי כל הכוחות:

$$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots$$

על מטענים חשמליים פועלים כוחות

מצדו של השדה החשמלי. כאשר השדות

בלתי תלויים ונוצרים על-ידי מטענים שונים,

יהיה הכוח השקול שווה לסכום הווקטורי של כל הכוחות, הנוצרים על-ידי כל

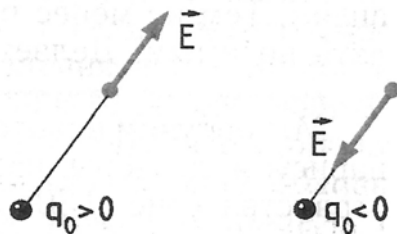
השדות. הניסיון מראה שכך בדיוק מתרחש במציאות; וזו ראייה שעוצמות השדה

מחוברות באופן וקטורי.

זהו עקרון הסופרפוזיציה (חפיפה) של שדות, המנוסח כך: כאשר

בנקודת מרחב מסוימת יוצרים חלקיקים טעונים שונים שדות חשמליים

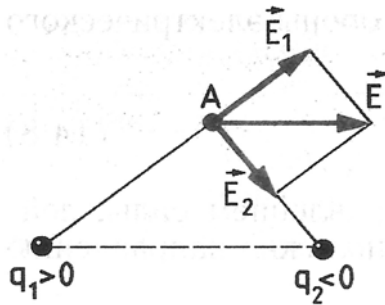
בעלי עוצמות $\vec{E}_1, \vec{E}_2, \vec{E}_3$ וכו', עוצמת השדה השקול באותה הנקודה היא:



ציור 178

$$(14.10) \quad \vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 + \dots$$

הודות לעקרון הסופרפוזיציה די לדעת את הביטוי (14.9) לעוצמת השדה של מטען נקודתי, כדי לחשב את עוצמת השדה של מערכת חלקיקים טעונים.



ציור 179 מלמד כיצד מחושבת עוצמת השדה, הנוצר על-ידי שני מטענים נקודתיים q_1 ו- q_2 בנקודה A.

ציור 179

השימוש במושג שדה חשמלי מאפשר לחלק לשתיים את חישוב הכוחות הפועלים בין מטענים חשמליים: תחילה מחשבים את עוצמת השדה הנוצר על-ידי המטענים, ואחר כך מחשבים את הכוחות על-פי עוצמות השדה הידועות. חלוקה כזאת של הבעיה מקילה בדרך כלל על החישובים.

?

1. מהי עוצמת השדה החשמלי?
2. מה עוצמת השדה של מטען נקודתי?
3. איך מכוונת עוצמת השדה של המטען q כאשר המטען $q_0 > 0$, וכאשר $q_0 < 0$?
4. נסחו את עקרון הסופרפוזיציה של שדות.

§94 קווי השדה החשמלי עוצמת השדה של כדור טעון

שדה חשמלי אינו פועל על חושי האדם: איננו מבחינים בו. עם זאת ניתן בקלות לראות את התפלגות השדה במרחב.

אפשר לקבל מושג כלשהו על התפלגות השדה, אם נצייר את וקטורי השדה

אלקטרוסטטיקה

בכמה נקודות במרחב (ציור 180א).

התמונה תהיה ברורה יותר, אם נצייר קווים רצופים, שהמשיק אליהם בכל נקודה מכווון ככיוונו של וקטור השדה. קווים אלה מכונים קווי השדה או קווי עוצמת השדה (ציור 180ב). קו שדה אינו גוף ממשי כחוט אלסטי מתוח או חבל, כפי שדמיין פאראדי לעצמו.



ציור 180א



ציור 180ב

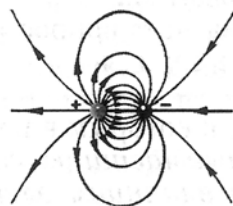
קווי השדה מאפשרים להציג את התפלגות השדה במרחב באופן ויזואלי בלבד, והם ממשיים לא יותר מקווי האורך וקווי הרוחב שעל פני קליפת כדור הארץ.

ניתן להמחיש את קווי השדה: אם נערבב היטב גבישונים מוארכים של מבודד (לדוגמה: גרגירי חיטה מרוסקים) בנוזל סמיך (לדוגמה: בשמן פשתן), ונטבול בנוזל גוף טעון. גבישונים המבודד יסתדרו אז בקרבת גוף טעון זה בשרשרת לאורך קווי השדה.

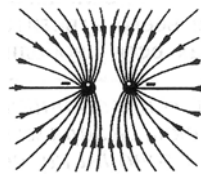
הציורים הבאים ממחישים דוגמאות של קווי שדה עבור כדור הטעון חיובית (ציור 181), עבור שני כדורים מטענים נגדיים (ציור 182), עבור שני לוחות מטענים השווים בגודלם ומנוגדים בסימנם (ציור 183). הדוגמה האחרונה חשובה במיוחד: רואים בה שבמרחב שבין הלוחות, באזור המרכזי, קווי השדה מקבילים: השדה החשמלי שווה בכל נקודה. שדה חשמלי, שעוצמתו שווה בכל נקודות המרחב, מכונה שדה אחיד. את השדה באזור המוגבל של המרחב אפשר לתאר כאחיד, אם עוצמתו בתוך האזור משתנה באופן לא משמעותי.



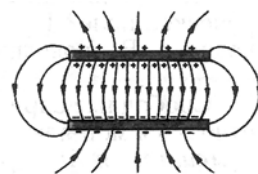
ציור 181



ציור 182



ציור 183



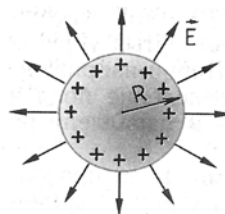
ציור 184

קווי השדה החשמלי אינם סגורים; מקורם במטענים חיוביים, וסופם במטענים שליליים.¹

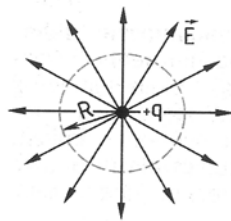
קווי השדה רציפים ואינם נחתכים, מכיוון שבנקודת החיתוך לא יהיה לשדה כיוון חד-משמעי. הקווים מתחילים ומסתיימים בגופים טעונים, ונמשכים לכיוונים שונים (ציור 181). לכן צפיפות קווי השדה גבוהה יותר בקרבת הגופים הטעונים – באזור שעוצמת השדה גדולה יותר.

שדה חשמלי של כדור טעון

נחקור את השדה החשמלי של כדור טעון מוליך שרדיוסו R . משיקולי סימטריה מכוונים קווי השדה החשמלי לאורך המשכי הרדיוסים של הכדור (ציור 185א).



(א)



(ב)

ציור 185

שימו לב: קווי השדה במרחב מחוץ לכדור זהים לקווי השדה של מטען נקודתי (ציור 185 ב). אם תמונות קווי השדה זהות, אפשר לצפות שזהים גם הערכים של עוצמות השדה. לכן במרחק של $r \geq R$ ממרכז הכדור מתוארת עוצמת השדה לפי אותה נוסחה (14.9), המגדירה את עוצמת השדה של מטען נקודתי הנמצא במרכז הכדור:

$$(14.11) \quad E = k \frac{|q|}{r^2}$$

עוצמת השדה בתוך כדור מוליך ($r < R$) שווה לאפס. בקרוב נוכיח זאת.

תמונת קווי השדה מראה בבירור כיצד מכוונת עוצמת השדה החשמלי בנקודות שונות במרחב. על-פי צפיפות הקווים ניתן לשפוט את שינוי עוצמת השדה במעבר מנקודה לנקודה.

¹ קווי השדה, המתוארים בציור 181, מתכנסים גם הם למטענים שליליים, הנמצאים רחוק אי-שם.

?

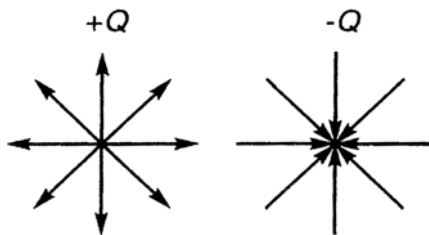
1. מהם קווי השדה החשמלי?
2. האם בכל המקרים יהיה מסלולו של חלקיק טעון זהה לקו השדה?
3. האם יכולים קווי השדה לחתוך זה את זה? מדוע?
4. מה עוצמת השדה של כדור טעון מוליך?

§ 94 א שטף השדה משפט גאוס

משפט גאוס מאפשר לחשב את עוצמת השדה במקרים רבים כאשר קיימת סימטריה בהתפלגות המטענים במרחב. כדי להשתמש במשפט גאוס יש להכיר תחילה את המושג **שטף של שדה חשמלי**.

כפי שראינו בסעיף הקודם, מוגדר כיוון השדה החשמלי בכל נקודה במרחב על-ידי קו השדה העובר דרך הנקודה; ווקטור השדה בכל נקודה מכוון לאורך המשיק לקו באותה הנקודה.

האם אפשר לתאר בצורה גרפית גם את עוצמת השדה בכל נקודה, בדומה לתיאור הגרפי של כיוון השדה ומגמתו?



אם נתבונן במפת קווי השדה של מטען בודד, נוכל להבחין שקרוב למטען הקווים צפופים, ורחוק ממנו – צפיפות הקווים, מספרם ליחידת אורך היקפי, קטן ככל שנרחיק מהמטען.

נתאר את עוצמת השדה במרחב על-ידי צפיפות קווי השדה. ציירנו N קווי שדה שיוצאים ממטען נקודתי, שגודלו Q , לכל הכיוונים ובצורה אחידה. במרחק R מהמטען יחדרו הקווים משטח כדורי שרדיוסו R ושטח פניו $4\pi R^2$; צפיפות הקווים (מספר קווי השדה ליחידת שטח) היא: $\sigma = \frac{N}{4\pi R^2}$.

$$E = k \frac{Q}{R^2} \quad \text{באותו מרחק מהמטען עוצמת השדה היא:}$$

עבור שתי נקודות, הנמצאות במרחקים R_1 ו- R_2 מהמטען המשרה, יהיה יחס

עוצמות השדה:

אלקטרוסטטיקה

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{k \frac{Q}{R_1^2}}{k \frac{Q}{R_2^2}} = \frac{R_2^2}{R_1^2}$$

וכזה יהיה גם היחס בין ערכי הצפיפות:

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_2} = \frac{\frac{Q}{4\pi R_1^2}}{\frac{Q}{4\pi R_2^2}} = \frac{R_2^2}{R_1^2}$$

המסקנה אפוא היא, שעוצמת השדה החשמלי בכל נקודה מתאפיינת בצפיפות קווי השדה באזור אותה נקודה.

אם ידועה צפיפות קווי השדה ליחידת שטח σ , ואם ידוע גודל השטח ΔS , ניתן לחשב גם את המספר הכולל של הקווים החודרים את השטח:

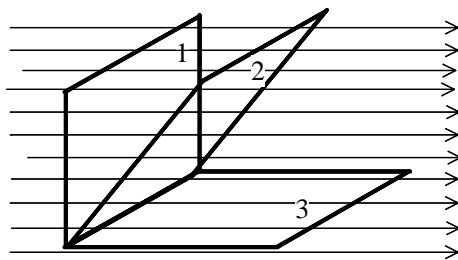
$$\Delta N = \sigma \cdot \Delta S \sim E \cdot \Delta S$$

כלומר: מספר קווי השדה, שחודרים משטח מסוים, פרופורציוני לעוצמת השדה בסביבת המשטח.

המכפלה $E \cdot \Delta S$ מכונה שטף השדה \vec{E} דרך משטח אלמנטרי ΔS :

$$\Delta \Phi = E \cdot \Delta S$$

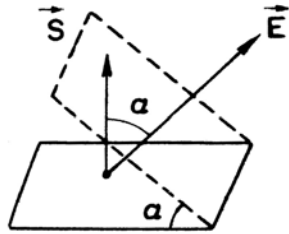
שטף השדה דרך משטח משמש כאמת-מידה למספר קווי השדה החודרים את המשטח.



עבור אותו שדה ואותו משטח תלוי מספר קווי השדה, החודרים את המשטח, בזווית בין מישור המשטח לבין כיוון הקווים: מספר הקווים במצב 1 הוא מרבי, במצב 2 קטן יותר, ובמצב 3 קווי השדה אינם חודרים את המשטח, אלא משיקים לו.

עובדה זאת מתבטאת בהגדרה מדויקת יותר של שטף השדה:

$$\Phi = \vec{E} \cdot \vec{S} \cdot \cos \alpha$$



כאשר: α – הזווית בין האנך למשטח לבין כיוון קו השדה.

כאשר המשטח עקום והשדה אינו אחיד משום שגודלו וכיוונו שונים בכל נקודה, חישוב השטף מורכב יותר, ובמקרה הכללי דורש חישוב של אינטגרל על פני כל השטח:

$$\Phi = \int \vec{E} \cdot d\vec{s}$$

נגדיר: כאשר "יוצאים" קווי השדה מהמשטח, ייחשב השטף כחיובי; כאשר "נכנסים" הקווים אל תוך המשטח, ייחשב השטף כשלילי.

אם קווי השדה חודרים נפח מסוים, הכלוא בתוך מעטפת סגורה, שווה מספר הקווים, החודרים ונכנסים אל תוך האזור, למספר הקווים היוצאים ממנו, והשטף הכולל שווה לאפס (מעטפת S_3 בשרטוט).

נחשב את שטף השדה, הנוצר על-ידי מטען נקודתי q דרך מעטפת כדורית שרדיוסה R (משטח S_1). מכיוון שבכל נקודה מכיוון קו השדה לאורך הרדיוס, שווה

הזווית α לאפס, ונקבל עבור השטף:

$$\Phi = E \cdot S \cdot \cos \alpha =$$

$$= E \cdot S = k \frac{q}{R^2} \cdot 4\pi R^2 = 4\pi k \cdot q$$

המסקנה היא שהשטף אינו תלוי ברדיוס

המעטפת הכדורית:

$$\Phi(S) = \Phi(S_1)$$

יתרה מזאת; מכיוון שהשטף הוא אמת מידה

למספר קווי השדה החוצים את המשטח, ניתן להסיק שהשטף דרך כל מעטפת המקיפה את המטען q (לדוגמה S_2) שווה לשטף החודר דרך משטח כדורי:

$$\Phi(S_2) = \Phi(S) = 4\pi k \cdot q$$

אלקטרוסטטיקה

אם בתוך מעטפת סגורה נמצאים כמה מטענים נקודתיים, שווה השטף דרך המעטפת לסכום:

$$\Phi = \sum \Phi_i = \sum 4\pi k \cdot q_i = 4\pi k \cdot \sum q_i = 4\pi k \cdot Q$$
$$Q = \sum q_i$$

זהו **משפט גאוס**, המתקיים עבור כל אוסף של מטענים, הכלואים בתוך מעטפת סגורה בעלת צורה כלשהי:

שטף השדה החשמלי, הנוצר על-ידי אוסף מטענים, דרך מעטפת סגורה כלשהי, שבתוכה כלואים מטענים היוצרים את השדה, יהיה פרופורציוני לסכום האלגברי של כל המטענים.

השטף אינו תלוי בצורת המעטפת, והוא מבטא את ההפרש בין מספר קווי השדה היוצאים מהמעטפת למספר הקווים הנכנסים אליה.

אם המטען הכולל בתוך המעטפת שווה לאפס, מתאפס גם השטף.

משפט גאוס מאפשר לחשב את עוצמת השדה, כאשר שיקולי סימטריה מאפשרים להסיק לגבי צורת המפה של קווי השדה.

חשוב לציין: משפט גאוס לא היה מתקיים, אילו חוק קולון היה כולל מרחק בין המטענים בחזקה השונה מ-2 (רק במקרה זה נחלש השדה בהתרחקות מהמטען באותה מידה ששטח המעטפת הכדורית סביב המטען גדל, והודות לכך שטף השדה נשמר).

נחזור לדוגמת עוצמת השדה סביב מטען נקודתי. לפי **חוק קולון** קטנה עוצמת השדה לפי ריבוע המרחק שבין המטען, שמשרה את השדה, לבין הנקודה בה נבדקת עוצמת השדה. **משפט גאוס** מאושש את **חוק קולון**: הרי התרחקות מהמטען המשרה שדה מגדילה את שטח פני המעטפת הכדורית לפי ריבוע רדיוס המעטפת; מאחר ששטף השדה נשמר, קטנה צפיפות קווי השדה באותו יחס, וצפיפות זו מעידה על עוצמת השדה בנוסחו של **חוק קולון**.

המשמעות היא שבאמצעות חוק גאוס ניתן לבדוק את חוק קולון (את תלות הכוח במרחק בין מטענים).

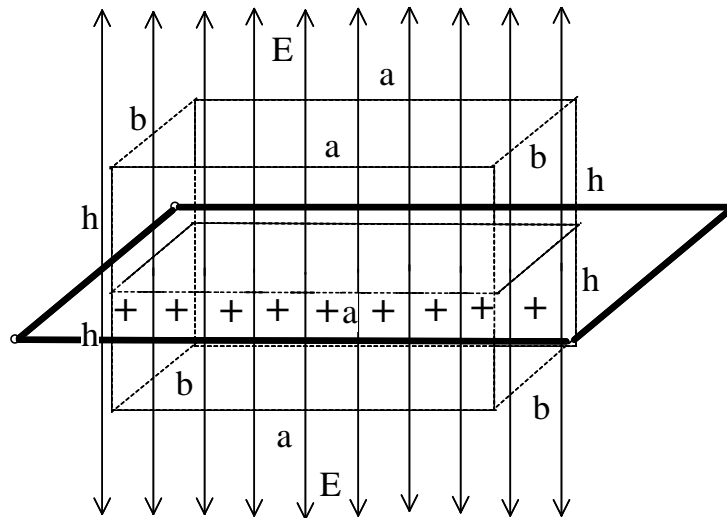
שימוש במשפט גאוס בחישוב שדה חשמלי

1. עוצמת שדה בקרבת מישור אינסופי טעון ומבודד, בעל צפיפות מטען σ (מטען ליחידת שטח פנים).

מכיוון שהמישור אינסופי ואין העדפה בין ימין לשמאל ובין לפנים ולאחור, ניתן להסיק שקווי השדה מכוונים במאונך למישור, והם יוצאים מהמישור לשני הכיוונים: מעלה ומטה.

פיזור אחיד של המטענים על פני השטח מאפשר להסיק על שוויון עוצמת השדה בכל הנקודות, הנמצאות במרחק שווה מהמישור.

נבחר מעטפת בצורת תיבה שמידותיה $a \times b \times (2h)$, הממוקמת באופן סימטרי משני צדי המישור הטעון. מכיוון שמשתי הדפנות – התחתונה והעליונה – קווי השדה יוצאים החוצה, אזי סימן השטף החשמלי דרך שתי הדפנות האלה הוא חיובי. השטף דרך הפאות האחרות של התיבה שווה לאפס, מכיוון שקווי השדה מקבילים למישורי הפאות.



לכן אם נסמן את גודל השדה בנקודות של הדופן העליונה באמצעות $E(h)$, יהיה שטף השדה דרך הדופן הזאת:

$$\Phi_1 = E(h) \cdot a \cdot b$$

כאן הנחנו הנחה סבירה : עוצמת השדה תלויה במרחק h מהמישור הטעון.
 השטף דרך הדופן התחתונה שווה לאותו ערך :

$$\Phi_2 = E(h) \cdot a \cdot b$$

על-פי משפט גאוס השטף הכולל פרופורציוני למטען הכולל בתוך המעטפת הסגורה :

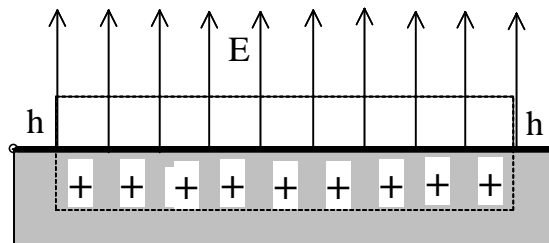
$$\Phi_1 + \Phi_2 = 2E(h) \cdot a \cdot b = 4\pi k \cdot a \cdot b \cdot \sigma$$

מכאן נחלץ את עוצמת השדה :

$$E(h) = 2\pi k \cdot \sigma$$

הפתעה: עוצמת השדה הנוצר על-ידי מישור טעון אינה תלויה במרחק מהמישור – ובלבד שיהיה קטן בהרבה ממימד אורכי של המשטח האינסופי הטעון.

2. עוצמת שדה חשמלי בקרבת מוליך טעון



נמצא כעת את עוצמת השדה החשמלי בקרבת המשטח של מוליך טעון, כאשר המטענים נמצאים במצב שיווי-משקל. בהעדר זרימה במוליך יהיו קווי השדה מאונכים למישור המשטח (אחרת היה קיים רכיב אופקי של השדה, שהיה גורם לתנועת המטענים החופשיים שבתוך המוליך). ניעזר גם בעובדה שבמצב שיווי-משקל בתוך המוליך שווה השדה החשמלי לאפס (אחרת היה גורם גם הוא לתנועת מטענים).

נבחר מעטפת בצורת תיבה בעלת גובה h ושטח דופן S , שנמצאת חלקית בתוך המוליך.

המטען הכולל הכלוא בתוך המעטפת שווה ל- $\sum q_i = \sigma \cdot S$, כאשר σ – צפיפות המטענים על פני המוליך.

משיקולי סימטריה אנו מסיקים שמחוץ למוליך מכוון השדה החשמלי אנכית.

לכן השטף הכולל דרך כל פאות המעטפת שווה לשטף דרך הדופן העליונה:

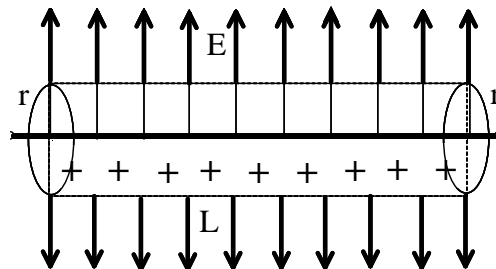
$$\Phi = E \cdot S \quad \text{על-פי חוק גאוס מקבלים:}$$

$$E(h) \cdot S = 4\pi k \cdot \sigma \cdot S,$$

$$E(h) = 4\pi k \cdot \sigma$$

כלומר: גם בקרבת משטח מוליך אין עוצמת השדה תלויה במרחק מהמשטח, וערכה כפול לעומת השדה, הנוצר על-ידי משטח טעון מבודד (מכיוון ששדה בתוך מוליך שווה לאפס, והמטענים המרוכזים במשטח חיצוני של המוליך "תורמים" ליצירת השדה מחוץ למוליך בלבד).

3. שדה חשמלי של תיל טעון אינסופי



נמצא את השדה חשמלי הנוצר על-ידי תיל ארוך אינסופי, הטעון לאורכו באופן אחיד, כלומר צפיפות המטענים (מטען ליחידת אורך) שווה ל- ρ . משיקולי סימטריה נובע שבכל נקודה במרחב מכיוון וקטור השדה בניצב לתיל (אחרת כיוון מסוים – לדוגמה: ימינה או שמאלה במישור הדרך – היה מועדף ללא שום סיבה), וגודלו תלוי במרחק מהתיל.

נבחר מעטפת בצורת הגליל, אשר צירו חופף לציר התיל, בעל אורך L ורדיוס R .

המטען הכלוא בתוך המעטפת שווה ל- $\Sigma q_i = \rho \cdot L$; השטף דרך בסיסי הגליל שווה לאפס; והשטף דרך המעטפת הצדדית של הגליל שווה ל:

$$\Phi = E(r) \cdot S = E(r) \cdot 2\pi r \cdot L$$

על-פי חוק גאוס:

$$E(r) \cdot 2\pi r \cdot L = 4\pi k \cdot \rho \cdot L$$

$$E(r) = 2k \frac{\rho}{r}$$

קיבלנו אפוא את התלות של עוצמת השדה במרחק מהתיל.
 באופן דומה אפשר לחשב שדות במקרים אחרים, כאשר קיימת סימטריה
 מרחבית בהתפלגות המטענים.

§95 מוליכים בשדה חשמלי

מה קורה לגופים טעונים המוכנסים לשדה חשמלי? קל לענות על שאלה זו
 כשעוסקים במוליך, המכיל מטענים חופשיים.

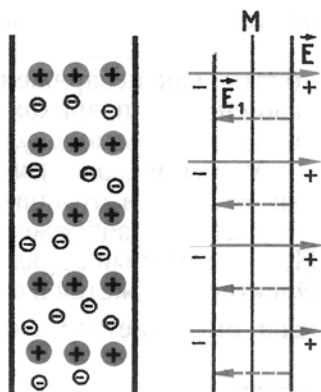
מטענים חופשיים

במוליכים – למשל: במתכות – נמצאים חלקיקים טעונים, העשויים לנוע
 בהשפעת השדה החשמלי. מסיבה זו מכנים את המטענים של החלקיקים האלה
מטענים חופשיים.

נושאי המטענים החופשיים במתכות הם האלקטרונים. בעת התגבשות המתכת
 פועלים האטומים הנייטרליים זה על זה, וכתוצאה מכך מאבדים האלקטרונים
 שבקליפות החיצוניות של האטומים את קשריהם עם האטומים שלהם, ונהיים
 ל"רכוש משותף" של כל המוליך. היונים החיוביים, שנוצרו בתהליך זה, עטופים אז
 בענן של אלקטרונים משותפים, הטעונים שלילית (ציור 186). אלקטרונים
 "משותפים" וחופשיים אלה משתתפים בתנועה תרמית, ויכולים לנוע בכל כיוון
 בתוך גוש המתכת.

השדה האלקטרוסטטי בתוך מוליך

הימצאותם של מטענים חופשיים במוליך
 מעידה, שבתוך המוליך לא קיים שדה
 אלקטרוסטטי. אילו היתה עוצמת השדה
 החשמלי בתוך המוליך שונה מאפס, היה השדה
 מניע את המטענים החופשיים בתנועה מסודרת,
 שמשמעה מעבר זרם חשמל במוליך. הקביעה
 של העדר שדה חשמלי בתוך המוליך נכונה הן
 עבור מוליך טעון והן עבור מוליך נייטרלי
 הנמצא בתוך שדה אלקטרוסטטי חיצוני.



ציור 186

ציור 187

נברר מהו התהליך, שכתוצאה ממנו מתאפס השדה החשמלי בתוך המוליך. נמחיש זאת באמצעות לוח לא טעון (מוליך) שהוכנס לשדה אחיד.

בהשפעת השדה החשמלי נעים האלקטרונים בתוך הלוח מימין לשמאל. ברגע ראשון, כאשר מכניסים את הלוח לשדה, נוצר זרם חשמל, והחלק השמאלי של הלוח נטען שלילית, והחלק הימני – חיובית. תופעה זו מכונה **השראה אלקטרוסטטית** (אם נפריד את הלוח לשניים לאורך הקו MN (ציור 187), יהיו שני החצאים טעונים). המטענים שהופיעו יוצרים את השדה שלהם (קווי שדה זה מתוארים בקווים מקווקווים בציור 187). תוך זמן קצר ביותר יסתדרו המטענים מחדש, וכך תקוזז עוצמת השדה של המטענים המוזזים לצדדים את השדה החיצוני, עוצמת השדה השקול בתוך הלוח תתאפס, ותנועת המטענים תיפסק. אם לא כן, היה זרם במוליך זרם תמידי, והיה נברא בו חום. על-פי חוק שימור האנרגיה תופעה זו בלתי אפשרית.

אם כן, **בתוך המוליך לא קיים שדה חשמלי**. על עובדה זו מבוססת ההגנה האלקטרוסטטית: על מנת להגן על מכשירים הרגישים לשדה חשמלי, מכניסים אותם לחלל של מעטפת מתכתית, שאין בו שדה חשמלי. קווי השדה האלקטרוסטטי מחוץ למוליך ובקרבת המשטח החיצוני מאונכים למשטח. אילו לא היה כך, היה קיים רכיב של עוצמת השדה במקביל למשטח המוליך, ובתוך המשטח היה עובר זרם.

המטען החשמלי של מוליכים

כאשר נפסקת תנועת המטענים, מתאפסת בתוך המוליך עוצמת השדה, ואין בתוכו מטען. **כל המטען הסטטי של המוליך מרוכז על המשטח החיצוני**. אילו היה קיים מטען בתוך המוליך, היה קיים בקרבתו גם שדה חשמלי. אולם בתוך המוליך אין שדה חשמלי, ולכן יכולים המטענים במוליך להימצא על המשטח החיצוני בלבד. התוצאה נכונה הן עבור מוליכים נייטרליים, הנמצאים בשדה חשמלי, והן עבור מוליכים טעונים.

כאשר המטענים נמצאים בשיווי-משקל, השדה החשמלי והמטען הכולל בתוך המוליך שווים לאפס. כל המטען מרוכז על פני שטח המוליך, וקווי השדה החשמלי מאונכים למשטח החיצוני של המוליך בכל נקודות המשטח.

אלקטרוסטטיקה

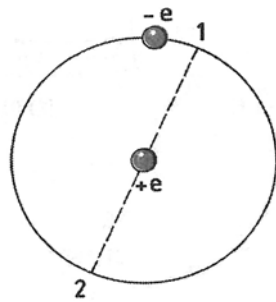
§96 המבדדים בשדה חשמלי שני סוגים של חומרים דיאלקטריים

כיצד משפיעים חומרים שאינם מוליכים על השדה האלקטרוסטטי? על מנת לברר זאת יש להכיר מקרוב את המבנה של חומרים אלה.

במבודד (או בגוף דיאלקטרי)¹ החלקיקים הטעונים באטומים נייטרליים – האלקטרוניים והפרוטונים שבגרעין – קשורים אלה באלה; הם לא נעים בהשפעת השדה, כפי שנעים האלקטרוניים החופשיים שבמוליך, ולכן מתנהגים באופן שונה בשדה אלקטרוסטטי. השדה החשמלי יכול להתקיים בתוך הגוף הדיאלקטרי, והגוף הדיאלקטרי משפיע על השדה השקול ביצירת שדה, נגדי לחיצוני, בתוכו.

תכונות חשמליות של אטומים ומולקולות נייטרליים

כדי להבין כיצד גוף דיאלקטרי לא טעון יוצר שדה חשמלי, יש להכיר תחילה את התכונות החשמליות של אטומים ומולקולות נייטרליים.



ציור 188

האטומים והמולקולות מורכבים מחלקיקים הטעונים מטען חיובי – הפרוטונים שבגרעין, ומחלקיקים הטעונים שלילית – האלקטרוניים. בציור 188 מתואר האטום הפשוט ביותר – של מימן. המטען החיובי של האטום (מטען הגרעין) מצוי במרכזו.

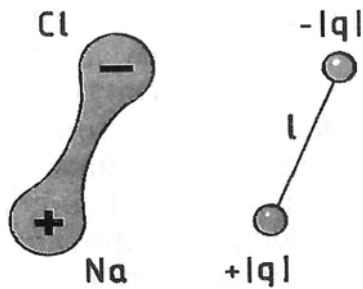
האלקטרון נע באטום במהירות גבוהה מאוד:

האלקטרון מבצע סיבוב אחד מסביב לגרעין בזמן קצר מאוד, כ- 10^{-15} sec. לכן במשך 10^{-9} sec הוא מספיק לעשות מיליון סיבובים, ובהתאם עובר מיליון פעמים דרך הנקודות 1 ו-2 הנמצאות באופן סימטרי יחסית לגרעין. מכך אפשר להסיק שמרכז ההתפלגות של המטען השלילי נמצא בממוצע כל הזמן במרכז האטום, כלומר במקומו של הגרעין החיובי.

אולם לא תמיד זה המצב. נסתכל במולקולה של מלח שולחן NaCl.

¹ בפיזיקה מכונים מבדדים בשם **דיאלקטריק**, מהמילה היוונית "דיא" – באמצעות, והמילה האנגלית "אלקטריק" – חשמלי (בשם **דיאלקטריק** מכונה חומר, שדרכו מועברות השפעות אלקטרומגנטיות).

בקליפת האלקטרונים החיצונית של הנתרן מצוי אלקטרון אחד, הקשור לאטום באופן חלש. לכלור שבעה אלקטרונים בקליפתו החיצונית. כאשר נוצרת מולקולת המלח, נתפס האלקטרון היחיד של נתרן על-ידי הכלור, ושני האטומים הנייטרליים נהיים למערכת של שני יונים בעלי מטענים נגדיים (ציור 189).



המטען החיובי והמטען השלילי אינם מפוזרים באופן סימטרי בנפח המולקולה: מרכז ההתפלגות של המטען החיובי נמצא על יון הנתרן, ושל המטען השלילי – על יון הכלור.

ציור 189

ציור 190

הדיפול החשמלי

ממרחק רב נראית המולקולה בקירוב כשני מטענים נקודתיים, השווים בגודלם ומנוגדים בסימנם והנמצאים במרחק l זה מזה (ציור 190). מערכת נייטרלית כזו של שני מטענים מכונה **דיפול חשמלי**.

שני סוגים של חומר דיאלקטרי

ניתן לחלק את החומרים הדיאלקטריים הקיימים לשני סוגים: החומר **הקוטבי**, המורכב ממולקולות, שבהן מרכזי ההתפלגות של המטען החיובי ושל המטען השלילי אינם חופפים; וחומר **שאינו קוטבי**, המורכב מאטומים או ממולקולות, שבהם מרכזי ההתפלגות של המטען החיובי והשלילי חופפים. לכן שונה מבנין של המולקולות של שני סוגי חומרים אלה. לחומרים דיאלקטריים קוטביים שייכים כוהל, מים ועוד; לאלה שאינם קוטביים שייכים הגזים האצילים, חמצן, מימן, בנזן, פוליאאתילן ואחרים.

קיימים שני סוגים של חומרים דיאלקטריים: קוטבי ושאינו קוטבי. הם נבדלים במבנה המולקולות שלהם.

?

1. במה שונה גוף דיאלקטרי ממוליך?
2. מה טיב מבנם המולקולרי של חומרים דיאלקטריים קוטביים, ושל אלה שאינם קוטביים?

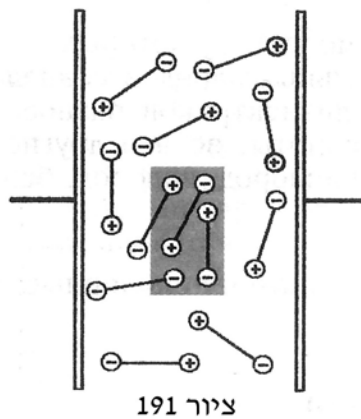
קיבוץ השמלי

§97 קיטוב החומר הדיאלקטרי

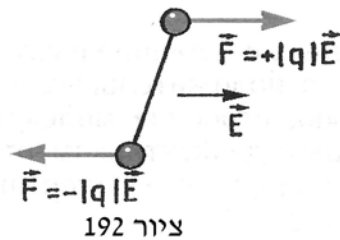
נראה כעת מה מתרחש בחומר דיאלקטרי הנמצא בשדה חשמלי.

קיטוב חומרים דיאלקטריים קוטביים

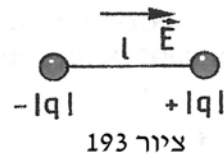
החומר הדיאלקטרי הקוטבי מורכב ממולקולות שצורתן דיפול חשמלי. התנועה התרמית גורמת להיעדר כיווניות (אוריינטציה) של הדיפולים (ציור 191). לכן על פני השטח של הגוף הדיאלקטרי – וכן בכל הנפח, המכיל מספר רב של מולקולות (המלבן המודגש בציור 191) – שווה ערך המטען החשמלי לאפס. כן שווה לאפס עוצמת השדה החשמלי בתוך הגוף הדיאלקטרי.



ציור 191



ציור 192



ציור 193

נכניס את הגוף הדיאלקטרי בין שני לוחות מתכת, הנושאים מטענים מנוגדים. אם גודל הלוחות עולה בהרבה על המרחק ביניהם, השדה בין הלוחות אחיד. בהשפעת שדה זה יפעלו על כל דיפול חשמלי שני כוחות מקבילים, השווים בגודלם אולם מנוגדים במגמתם (ציור 192). כך נוצר מומנט כוחות השואף לסובב את הדיפול כך, שצירו יכוון לאורך קווי השדה (ציור 193): הקוטב החיובי יזוז עם מגמת השדה החשמלי, והשלילי – במגמה ההפוכה.

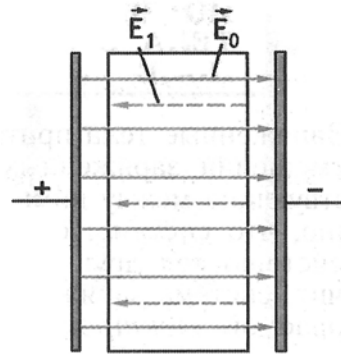
תזוזת המטענים החיוביים והשליליים, הקשורים ביניהם בתוך התווך הדיאלקטרי, לכיוונים נגדיים מכונה קיטוב.

אולם התנועה התרמית מונעת את היווצרות הכיווניות האחידה של כל הדיפולים. מצב כזה אפשרי בטמפרטורת האפס המוחלט בלבד, ואז היו כל הדיפולים מתייצבים לאורך קווי השדה. השפעת השדה גורמת לסידור מועדף חלקי

של הדיפולים החשמליים: מספר הדיפולים המכוונים במגמת השדה גדול יותר ממספרם של אלה נטולי הכיוון המועדף. ציור 194 מראה שליד הלוח הטעון חיובית מופיע על פני הגוף הדיאלקטרי עודף מטענים שליליים של דיפולים, וליד הלוח הטעון שלילית יש יותר מטענים חיוביים. כתוצאה מכך נוצר בפאותיו של הגוף הדיאלקטרי מטען מקושר. בתוך הגוף הדיאלקטרי מקוזים המטענים החיוביים והשליליים של הדיפולים זה את זה, והמטען המקושר הממוצע שווה לאפס.



ציור 194



ציור 195

קיטוב גוף דיאלקטרי שאינו קוטבי

גוף דיאלקטרי, העשוי מחומר שאינו קוטבי, משנה אף הוא את תכונות הקיטוב בשדה חשמלי. בהשפעת השדה זזים המטענים החיובי והשלילי של המולקולה לכיוונים מנוגדים, ומרכזי ההתפלגות של המטענים אינם חופפים עוד. את המולקולות המעוותות האלה ניתן לתאר כדיפולים חשמליים, שציריהם מכוונים לאורך השדה. על פני המשטחים של הגוף הדיאלקטרי, הצמודים ללוחות הטעונים, יופיעו מטענים מקושרים, כמו במקרה של גוף דיאלקטרי קוטבי.

בתוך החומר הדיאלקטרי יוצר המטען המקושר שדה חשמלי שעוצמתו \vec{E}_1 , והוא מכוון כנגד עוצמת השדה החיצוני, הנוצר על-ידי מטעני הלוחות (ציור 195). עקב כך נחלש השדה בתוך החומר; מידת ההיחלשות של השדה תלויה בתכונות החומר הדיאלקטרי.

המטענים הקשורים בתוך החומר הדיאלקטרי זזים בשדה חשמלי בכיוונים מנוגדים, ונוצר קיטוב החומר. החומר הדיאלקטרי המקוטב עצמו יוצר שדה חשמלי. שדה זה מחליש את השדה החיצוני בתוך החומר הדיאלקטרי.



1. מהו קיטוב החומר הדיאלקטרי ?
2. כיצד משפיע החומר הדיאלקטרי על עוצמת השדה החשמלי ?

§98 אנרגיה פוטנציאלית של גוף טעון בשדה חשמלי

גופים טעונים מושכים או דוחים זה את זה. במהלך תנועתם של גופים טעונים (כמו בניסוי עלי האלקטרוסקופ) הכוחות הפועלים ביניהם מבצעים עבודה. מקורס המכניקה ידוע, שאם מערכת יכולה לבצע עבודה על-ידי כוחות הפועלים בין הגופים המרכיבים אותה, אצורה בה אנרגיה פוטנציאלית. לכן במערכת של גופים טעונים אצורה אנרגיה פוטנציאלית, והיא מכונה **אנרגיה אלקטרוסטטית** או **אנרגיה חשמלית**.

המושג **אנרגיה פוטנציאלית אלקטרוסטטית** קשה ביותר להבנה. זכרו עד כמה קשה היה להפנים אנרגיה פוטנציאלית במכניקה: אנו חשים בכוח – אך לא חשים באנרגיה הפוטנציאלית האצורה במערכת. האנרגיה הפוטנציאלית, האצורה בגופנו בקומה החמישית של בית, גדולה בהרבה מזו שבקומה הראשונה, אולם אנחנו לא חשים בזאת כלל; ההפרש בין מנות האנרגיה האצורות בגופנו מומחש בעבודה שביצענו במהלך העלייה לקומה הגבוהה – או בנוק שייגרם, חלילה, בנפילה מהקומה החמישית.

אנרגיית הקשר בין האלקטרוונים לבין הגרעין באטום ואנרגיית הקשר בין האטומים במולקולות (האנרגיה הכימית) – ברובה אנרגיה חשמלית היא. אנרגיה חשמלית ענקית נאגרת בתוך הגרעין, והיא נפלטת כחום במהלך העבודה של כור גרעיני בתחנת כוח גרעינית.

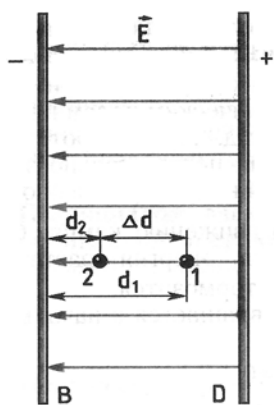
מנקודת מבטה של תורת הפעולה מקרוב פועל במישרין על המטען שדה חשמלי, שנוצר על-ידי מטען אחר. במהלך תנועת המטען מבצע הכוח, הפועל עליו מצדו של השדה, עבודה (בהמשך, כדי לקצר, נדבר על "עבודת השדה"). לכן אפשר לומר ש**גוף טעון, הנמצא בשדה חשמלי, נושא אנרגיה**. נמצא את האנרגיה, שנושא מטען הנמצא בשדה חשמלי אחד.

העבודה בהעתקת המטען בשדה אלקטרוסטטי אחיד

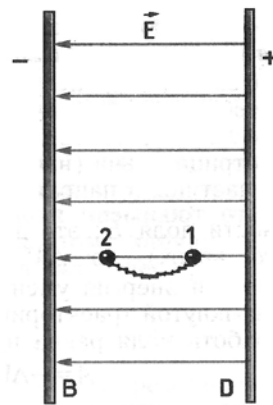
את השדה האחיד יוצרים, למשל, לוחות מתכת גדולים בעלי מטענים מנוגדים. שדה זה פועל על המטען בכוח קבוע $\vec{F} = q\vec{E}$, בדומה לכוח $\vec{F} = mg$ שבו פועל כדור הארץ על אבן בקרבת הקרקע.

התבוננו בלוחות (ציור 196): הלוח השמאלי B טעון שלילית, והלוח הימני D טעון חיובית. נחשב את העבודה, שמבצע השדה בהעתקת מטען חיובי q מנקודה 1, הנמצאת במרחק d_1 מלוח B – לנקודה 2, הנמצאת במרחק $d_2 < d_1$ מאותו לוח. הנקודות 1 ו-2 נמצאות על קו שדה אחד.

על קטע הדרך $\Delta d = d_1 - d_2$ מבצע השדה החשמלי עבודה חיובית:



ציור 196



ציור 197

$$(14.12) \quad A = qE(d_1 - d_2) = -(qEd_2 - qEd_1)$$

עבודה זו אינה תלויה בצורת המסלול – בדומה לעבודת כוח הכבידה, שאף היא אינה תלויה בצורת המסלול. נוכיח זאת באמצעות חישוב:

נחשב את העבודה בהעברת המטען לאורך עקומה כלשהי, המחברת את נקודות 1 ו-2. את ההעתקה לאורך קו חלק אפשר לתאר בקירוב כתנועה בקו מדורג בעל מדרגות זעירות (ציור 197). בהעברת המטען לאורך המדרגות הניצבות לוקטור השדה \vec{E} לא מתבצעת עבודה. על המדרגות המקבילות לכיוון השדה \vec{E}

מתבצעת העבודה (14.12), מכיוון שסכום הקטעים האופקיים שווה ל- $\Delta d = d_1 - d_2$.

האנרגיה הפוטנציאלית

אם העבודה אינה תלויה בצורת המסלול, היא שווה לשינוי האנרגיה הפוטנציאלית בסימן נגדי:

$$(14.13) \quad A = -(W_{p_2} - W_{p_1}) = -\Delta W_p$$

נשווה את התוצאה (14.12) להגדרה הכללית של האנרגיה הפוטנציאלית (14.13), וניווכח שהאנרגיה הפוטנציאלית של מטען בשדה חשמלי אחיד שווה ל:

$$(14.14) \quad W_p = qEd$$

הנוסחה (14.14) דומה לנוסחה $W_p = mgh$, המבטאת את האנרגיה הפוטנציאלית של גוף מעל פני הקרקע; אולם להבדיל מהמסה, עשוי המטען q להיות חיובי וגם שלילי.

אם השדה מבצע עבודה חיובית, הולכת האנרגיה הפוטנציאלית של גוף טעון בשדה וקטנה: $\Delta W_p < 0$. בו-בזמן, בהתאם לחוק שימור האנרגיה, גדלה האנרגיה הקינטית של המסה, הנושאת את המטען. כך מתבצעת האצת האלקטרונים בשדה חשמלי במנורות רדיו, בשפופרות טלוויזיה וכדומה – ולהפך: כאשר העבודה שלילית, דומה תנועת חלקיק הטעון חיובית כנגד מגמת השדה \vec{E} לתנועת האבן שנזרקה כלפי מעלה, ואז $\Delta W_p > 0$: האנרגיה הפוטנציאלית הולכת וגדלה, והאנרגיה הקינטית פוחתת: החלקיק נבלם.

בהזזת המטען לאורך מסלול סגור, כאשר המטען חוזר לנקודת ההתחלה, מתאפסת עבודת השדה: $A = -\Delta W_p = -(W_{p_1} - W_{p_1}) = 0$.

חלקיקים טעונים בשדה חשמלי נושאים אנרגיה פוטנציאלית. בהעברת החלקיק מנקודת שדה אחת לאחרת מבצע השדה החשמלי עבודה, שאינה תלויה בצורת המסלול. עבודה זו שווה לשינוי האנרגיה הפוטנציאלית בסימן מינוס.

?

1. כיצד קשורים שינויי האנרגיה הפוטנציאלית ועבודת השדה החשמלי?
2. מהי האנרגיה הפוטנציאלית של חלקיק טעון בשדה חשמלי אחיד?

§99 פוטנציאל השדה החשמלי הפרש פוטנציאליים

פעולה הדדית של גופים זה על זה מתאפיינת במכניקה בכוח או באנרגיה פוטנציאלית. גם השדה החשמלי, המבצע פעולות בין מטענים, מתאפיין בשני ערכים: עוצמת השדה היא הערך ה"כוחני"; ובערך האנרגטי – הפוטנציאל – נדון עתה.

פוטנציאל השדה

כמו במקרה הפרטי של שדה אחיד, העבודה – המתבצעת על-ידי שדה חשמלי כלשהו בהעברת מטען מנקודה אחת לאחרת – אינה תלויה בצורת המסלול. **עבודה של שדה אלקטרוסטטי לאורך מסלול סגור שווה לאפס. שדות בעלי תכונה זאת מכונים שדות פוטנציאליים.**

את עבודת השדה הפוטנציאלי אפשר לבטא באמצעות שינוי האנרגיה הפוטנציאלית. הנוסחה $A = - (W_{p_2} - W_{p_1})$ נכונה לכל שדה פוטנציאלי. רק כשעוסקים בשדה אחיד ניתן לחשב את האנרגיה הפוטנציאלית הנאצרת לפי נוסחה (14.14).

הפוטנציאל

האנרגיה הפוטנציאלית של המטען בשדה אלקטרוסטטי פרופורציונלית לגודל המטען. הדבר נכון גם לשדה אחיד [ראו נוסחה (14.14)] ולכל שדה אחר. לכן **היחס בין האנרגיה הפוטנציאלית, האצורה במטען שבשדה, לבין גודל המטען אינו תלוי בערך המטען.**

עובדה זו מאפשרת להגדיר ערך כמותי חדש בשדה, שאינו תלוי במטען שנמצא בשדה: **הפוטנציאל.**

הפוטנציאל בשדה האלקטרוסטטי הוא היחס בין האנרגיה הפוטנציאלית של המטען הנמצא בשדה לבין גודלו של המטען.

היבול חשמלי

בהתאם להגדרה זו שווה הפוטנציאל:

$$(14.15) \quad \varphi = \frac{W_p}{q}$$

עוצמת השדה \vec{E} היא **וקטור**, המאפיין את הכוח הפועל על המטען q בנקודה נתונה של השדה. הפוטנציאל φ הוא **סקלר**, המאפיין את אנרגיית השדה בנקודת שדה נתונה. הפוטנציאל מגדיר את האנרגיה הפוטנציאלית של המטען בנקודת שדה נתונה.

אם נקבע כרמת אפס של אנרגיה פוטנציאלית – ובהתאם, של הפוטנציאל – בלוח הטעון שלילית (ציור 196), אזי לפי הנוסחאות (14.14) ו-(14.15) הפוטנציאל של הלוח הימני יהיה:

$$(14.16) \quad \varphi = \frac{W_p}{q} = Ed$$

הפרש פוטנציאלים

בדומה לאנרגיה פוטנציאלית, תלוי ערך הפוטנציאל בנקודה מסוימת בבחירה של רמת האפס לערך הפוטנציאל. אין משמעות מעשית לפוטנציאל בנקודה מסוימת; חשוב יותר **הפרש הפוטנציאלים בין שתי נקודות בשדה**, והוא אינו תלוי בבחירתה של רמת האפס.

מכיוון שהאנרגיה הפוטנציאלית שווה ל- $W_p = q\varphi$, שווה העבודה:

$$(14.17) \quad A = - (W_{p_2} - W_{p_1}) = -q (\varphi_2 - \varphi_1) = q (\varphi_1 - \varphi_2) = qU$$

כאן:

$$(14.18) \quad U = \varphi_1 - \varphi_2$$

הוא **הפרש הפוטנציאלים**, כלומר **הפרש ערכי הפוטנציאלים בין הנקודה הסופית לבין זו ההתחלתית של המסלול**.

הפרש הפוטנציאלים מכונה גם **מתח**.

לפי נוסחאות (14.17) ו-(14.18) שווה הפרש הפוטנציאלים:

$$(14.19) \quad U = \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A}{q}$$

הפרש הפוטנציאלים (המתח) בין שתי נקודות שווה ליחס שבין עבודת השדה בהעברת המטען מנקודה התחלתית לנקודה סופית לבין גודל המטען.

אם ידוע לנו המתח ברשת תאורה, יודעים אנו את שיעור העבודה שיבצע שדה חשמלי בהעברת מטען יחיד ממגע אחד של השקע אל המגע האחר. עוד נפגוש במושג **הפרש פוטנציאלים** בכל פרקי הקורס.

היחידה הפיזיקלית של הפרש הפוטנציאלים

את היחידה הפיזיקלית של הפרש הפוטנציאלים קובעים באמצעות הנוסחה (14.19). במערכת היחידות הבינלאומית SI מבטאים את העבודה בג'אולים, ואת המטען – בקולונים. לכן הפרש הפוטנציאלים בין שתי נקודות שווה ליחידה אחת, אם בהעברת מטען של 1 Q מנקודה אחת לאחרת בשדה מתבצעת עבודה של 1 J .

$$1\text{ V} = \frac{1\text{ J}}{1\text{ C}} \quad \text{: וולט (V)}$$

המאפיין האנרגטי של השדה האלקטרוסטטי מכונה **פוטנציאל**. הפוטנציאל שווה ליחס שבין האנרגיה הפוטנציאלית של מטען לבין גודלו של המטען. הפרש הפוטנציאלים בין שתי נקודות בשדה שווה לעבודה הדרושה להעברת מטען של יחידה בין שתי נקודות אלה.

?

1. אילו שדות מכונים שדות פוטנציאליים ?
2. מהי ההגדרה של הפוטנציאל ?
3. מדוע תלוי הפרש הפוטנציאלים בין שתי נקודות השדה בעבודת השדה החשמלי ?
4. הגדירו את היחידה הפיזיקלית של הפרש הפוטנציאלים: וולט.

§100 הקשר בין עוצמת השדה האלקטרוסטטי להפרש הפוטנציאלים משטחים שויי-פוטנציאל

ניתן לקבוע ערך כלשהו לפוטנציאל בנקודת מרחב נתונה, אולם הפרש הפוטנציאלים במעבר מנקודה נתונה לנקודה סמוכה מוגדר וחד-משמעי. ידיעת הפוטנציאל בכל נקודות השדה מספקת ידע על השדה כולו: ניתן אז למצוא את עוצמת השדה, משום שבין עוצמת השדה לבין הפרש הפוטנציאלים קיים קשר. נלמד אותו כעת.

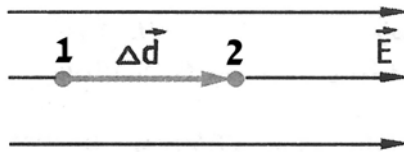
קיבוץ השמלי

כשמטען q נע במגמת עוצמת שדה אחיד \vec{E} מנקודה 1 לנקודה 2, הנמצאת במרחק Δd מנקודה 1 (ציור 198), מבצע השדה החשמלי עבודה:

$$A = q \cdot E \cdot \Delta d$$

בהתאם לנוסחה (14.19) אפשר לבטא עבודה זו באמצעות הפרש הפוטנציאלים

בנקודות 1 ו-2:



$$(14.20) \quad A = q(\varphi_1 - \varphi_2) = qU$$

ציור 198

נשווה את הביטויים לעבודה, ונמצא את

גודלו של וקטור עוצמת השדה:

$$(14.21) \quad E = \frac{U}{\Delta d}$$

כאשר U – הפרש הפוטנציאלים בין הנקודות 1 ו-2, הקשורות באמצעות וקטור ההעתק $\vec{\Delta d}$, המכוון במגמת וקטור השדה \vec{E} (ראו ציור 198).

מהנוסחה (14.21) נלמד: ככל שקטן שינוי הפוטנציאל למרחק Δd , קטנה עוצמת השדה האלקטרוסטטי; אם אין הפוטנציאל משתנה כלל, שווה עוצמת השדה לאפס.

מכיוון שבמהלך העברת המטען החיובי במגמת הווקטור \vec{E} מבצע השדה האלקטרוסטטי עבודה חיובית $A = q(\varphi_1 - \varphi_2)$, גדול הפוטנציאל φ_1 מהפוטנציאל φ_2 . לכן מכוונת עוצמת השדה החשמלי במגמת הקטנת הפוטנציאל.

באזור מצומצם של המרחב ניתן לתאר שדה חשמלי כשדה אחיד. לכן נכונה הנוסחה (14.21) לשדה אלקטרוסטטי כלשהו, בתנאי שהמרחק Δd כה קטן, שניתן להזניח את שינוי עוצמת השדה בנקודות שונות לאורך מרחק זה.

יחידת עוצמת השדה החשמלי

את היחידה של עוצמת השדה האלקטרוסטטי במערכת SI קובעים באמצעות הנוסחה (14.21): עוצמת השדה שווה ליחידה אחת, אם הפרש הפוטנציאלים בין

שתי נקודות בשדה אחיד, שהמרחק ביניהן 1 m , שווה ל- 1 V .

שם יחידה זו: **וולט למטר (V/m)**.

את העוצמה אפשר לבטא גם בניוטונים לקולון:

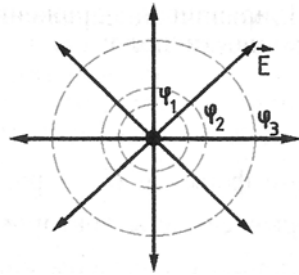
$$1 \frac{\text{V}}{\text{m}} = 1 \frac{\text{J}}{\text{Q}} \cdot \frac{1}{\text{m}} = 1 \frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{Q}} \cdot \frac{1}{\text{m}} = 1 \frac{\text{N}}{\text{Q}}$$

משטחים שווי-פוטנציאל

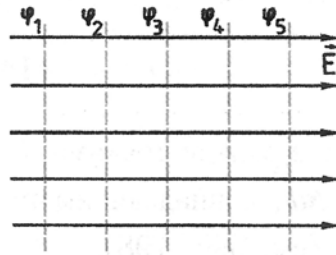
בהעברת המטען בזווית 90° לקווי השדה לא מתבצעת עבודה, מכיוון שהכוח ניצב להעתק. לכן אם נתווה משטח, המאונך בכל נקודותיו לקווי השדה, לא תתבצע עבודה בהעברת המטען על פני משטח זה.

המשמעות הנובעת מכך: **בכל נקודות המשטח, המאונך לקווי השדה, הפוטנציאל שווה**. משטח זה מכונה: **משטח שווה-פוטנציאל**.

משטחים שווי-פוטנציאל של שדה אחיד הם מישוריים (ציור 199), ושל שדה המטען הנקודתי – כדוריים בעלי מרכז משותף (ציור 200).



ציור 200



ציור 199

בדומה לקווי השדה מתארים משטחים שווי-פוטנציאל באופן איכותי את התפלגות השדה במרחב. וקטור עוצמת השדה מאונך למשטח שווה-פוטנציאל ומכוון במגמת הפחתת הפוטנציאל.

פניו של כל מוליך בשדה אלקטרוסטטי הם משטח שווה-פוטנציאל: הרי קווי השדה מאונכים למשטח המוליך! עם זאת, לא רק לפניו, אלא גם לכל הנקודות שבתוך המוליך פוטנציאל שווה. עוצמת השדה בתוך המוליך שווה לאפס, ולכן שווה לאפס גם הפרש הפוטנציאלים בין כל הנקודות בתוך המוליך.

גודל עוצמת השדה האלקטרוסטטי בין שתי נקודות קרובות בשדה שווה להפרש הפוטנציאלים מחולק במרחק שבין הנקודות.

?

1. מה הפרש הפוטנציאלים בין שתי נקודות בתוך מוליך טעון?
2. ציירו באופן מקורב את תמונת המשטחים שווי-הפוטנציאל של שדה הדיפול החשמלי (ראו ציור 182).
3. כיצד קשור הפרש הפוטנציאלים בעוצמת השדה החשמלי?

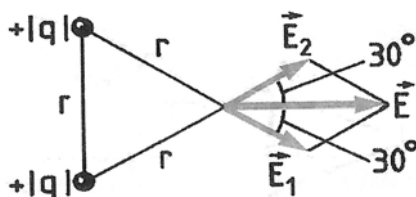
דוגמאות לפתרון תרגילים

בפתרון תרגילים, הקשורים במושג **עוצמת השדה החשמלי**, יש להשתמש בנוסחאות (14.8) ו-(14.11), המגדירות את הכוח, הפועל על מטען מצדו של השדה חשמלי, ואת עוצמת השדה של מטען נקודתי. עוצמת השדה, הנוצרת על-ידי כמה מטענים נקודתיים, שווה לסכום הווקטורי של עוצמות השדות של המטענים הבודדים.

את עבודת הכוחות, הפועלים על המטען בשדה, ניתן לבטא באמצעות הפרש האנרגיות הפוטנציאליות או באמצעות הפרש פוטנציאלים [ראו את הנוסחה (14.20)]. פוטנציאל השדה האחיד מוגדר על-ידי הנוסחה (14.16).

כדאי לזכור: לכל הנקודות על פני המוליך פוטנציאל שווה, ועוצמת השדה בתוך המוליך שווה לאפס.

1. שני מטענים נקודתיים חיוביים זהים נמצאים בריק במרחק r זה מזה. מצאו את עוצמת השדה החשמלי בנקודה, הנמצאת באותו מרחק r מכל אחד מהמטענים.



ציור 201

פתרון

בהתאם לעקרון הסופרפוזיציה שווה העוצמה המבוקשת \vec{E} לסכום הווקטורי של עוצמות השדה, הנוצרות על-ידי כל אחד מהמטענים (ציור 201).

$$E_1 = E_2 = k \frac{|q|}{r^2} \quad \text{עוצמות השדה של כל אחד מהמטענים שוות:}$$

האלכסון של המקבילית, הבנויה על הווקטורים \vec{E}_1 ו- \vec{E}_2 , הוא עוצמת השדה

קיבול חשמלי

השקול. גודלו שווה ל:

$$E = 2E_1 \cos 30^\circ = 2k \frac{|q|}{r^2} \frac{\sqrt{3}}{2} = k \frac{|q|\sqrt{3}}{r^2}$$

2. כדור מוליך חלול, שרדיוסו $r = 0.2 \text{ m}$ והנושא מטען $q = 1.8 \cdot 10^{-4} \text{ Q}$, נמצא בריק.

מצאו את: א) גודל עוצמת השדה \vec{E} על פני הכדור;

ב) גודל עוצמת השדה \vec{E}_1 בנקודה המרוחקת $r_1 = 10 \text{ m}$ ממרכז הכדור;

ג) גודל עוצמת השדה \vec{E}_0 במרכז הכדור;

ד) פי כמה גדול הפוטנציאל במרכז הכדור מהפוטנציאל שעל פניו?

פתרון

השדה החשמלי מחוץ לכדור טעון זהה לשדה של מטען נקודתי הממוקם

במרכזו. לכן:

$$E = k \frac{|q|}{r^2}$$

אי לכך:

$$E = k \frac{|q|}{r^2} \approx 4 \cdot 10^7 \frac{\text{V}}{\text{m}} \quad \text{א)}$$

$$E_1 = k \frac{|q|}{r_1^2} \approx 16 \cdot 10^3 \frac{\text{V}}{\text{m}} \quad \text{ב)}$$

ג) עוצמת השדה בכל נקודה בתוך כדור מוליך שווה לאפס: $E_0 = 0$;

ד) הפוטנציאלים של כל הנקודות בתוך הכדור שווים.

מקבץ תרגילים 17

1. בשדה חשמלי אחיד המכוון אנכית מטה נמצאת טיפת שמן. עוצמת השדה

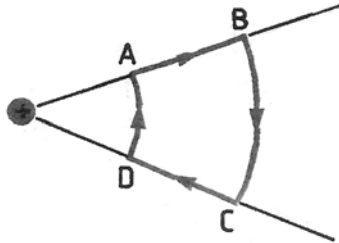
$$1.3 \cdot 10^5 \frac{\text{V}}{\text{m}}, \text{ ומסת הטיפה } 2 \cdot 10^{-9} \text{ g. הטיפה נמצאת בשיווי-משקל.}$$

מצאו את מטען הטיפה ואת מספר האלקטרונים העודפים שעליה.

2. מדוע מושך מסרק טעון חתיכות נייר נייטרליות?

3. מטען חשמלי $q_1 > 0$ הועבר במסלול סגור ABCD בשדה של מטען נקודתי

$q_2 > 0$ (ציור 202). באילו קטעים היתה עבודת השדה חיובית? שלילית? שווה



ציור 202

לאפס? בכמה השתנתה האנרגיה הפוטנציאלית של המערכת? למה שווה העבודה הכוללת שהושקעה בהעברת המטען?

4. תוך כדי תנועה בשדה חשמלי עבר אלקטרון מנקודה אחת לאחרת במעלה

פוטנציאל של 1 V.

בכמה השתנתה האנרגיה הקינטית של האלקטרון? בכמה השתנתה האנרגיה הפוטנציאלית שלו?

5. המטענים הנקודתיים $q_1 > 0$ ו- $q_2 < 0$ ממוקמים בשני קודקודים של משולש שווה-צלעות, שאורך צלעו r . מהו גודל וקטור עוצמת השדה בקודקוד השלישי?

6. הפוטנציאל של שדה אלקטרוסטטי הולך וגדל מלמטה למעלה. להיכן מכוון וקטור עוצמת השדה?

7. הפרש הפוטנציאלים בין נקודות, הנמצאות על קו שדה אחד ובמרחק 3 ס"מ זו מזו, הוא 120 וולט. מצאו את עוצמת השדה האלקטרוסטטי, אם ידוע שהשדה אחיד.

8. התוו משטחים שווי-פוטנציאל סביב גליל אינסופי מוליך, הטעון באופן אחיד.

9. בתנועתו בשדה חשמלי הגביר אלקטרון את מהירותו מ- $v_1 = 1 \cdot 10^7 \frac{m}{sec}$ ל- $v_2 = 3 \cdot 10^7 \frac{m}{sec}$. מצאו את הפרש הפוטנציאלים בין הנקודה ההתחלתית לבין הנקודה הסופית של מסלול האלקטרון. היחס בין מטען

$$\frac{e}{m} = 1.87 \cdot 10^{17} \frac{C}{kg}$$

§101 קיבול חשמלי יחידות הקיבול

נדון עתה בסוגיה מעשית וחשובה: באילו תנאים אפשר לאגור מטען חשמלי ניכר על מוליך?

בשיטת הטעינה באמצעות שפשוף – במכונה אלקטרוסטטית, בתא גלווני

קיבול חשמלי

וכדומה – נטענים הגופים שתחילה היו נייטרליים, משום שחלק מהחלקיקים הטעונים עובר מגוף אחד לאחר. בדרך כלל חלקיקים אלה הם אלקטרונים.

במהלך הטעינה של שני גופים מוליכים – לדוגמה באמצעות המכונה האלקטרוסטטית – אחד מהם מקבל מטען $+|q|$ והאחר $-|q|$. בין המוליכים מופיע שדה חשמלי, ונוצר הפרש פוטנציאלים (מתח). עם הגדלת המתח גדל גם השדה החשמלי. ככל שגדל המתח בין המוליכים, כך אפשר לאגור בהם מטען גדול יותר.

אולם בשדה חשמלי חזק (במתח גבוה) הופך החומר הדיאלקטרי שבין המוליכים הנטענים (לדוגמה: האוויר), למוליך, ומתרחשת אז פריצה בחומר הדיאלקטרי: בין המוליכים עובר ניצוץ חשמלי, והם מתרוקנים.

קיבול חשמלי

נגדיר את הגודל הפיזיקלי, המאפיין את היכולת של שני מוליכים לאגור מטען חשמלי. גודל זה מכונה: **קיבול חשמלי**.

המתח U בין שני מוליכים פרופורציונלי למטענים הנמצאים עליהם (על אחד - $+|q|$ ועל האחר - $-|q|$). אם נכפיל את המטענים, תוכפל גם עוצמת השדה החשמלי, ולכן עבודת השדה בהעברת המטען תהיה כפולה, ויגדל פי 2 גם המתח. אם כך, היחס בין המטען q , הנמצא על אחד המוליכים (על המוליך האחר נמצא מטען השווה בגודלו ל- q), לבין הפרש הפוטנציאלים בין המוליך לשכנו איננו תלוי במטען – אלא מוגדר על-ידי מידות המוליכים, צורתם, מיקומם היחסי ועל-ידי התכונות החשמליות של התווך (עניין מעניין זה עוד יידון בהמשך לימודנו).

עתה ניתן להגדיר את מושג **הקיבול החשמלי** של שני מוליכים:

קיבול חשמלי של שני מוליכים הוא היחס שבין המטען של אחד מהם לבין הפרש הפוטנציאלים שבין שני המוליכים:

$$C = \frac{q}{U} \quad (14.22)$$

ככל שקטן המתח U , הנוצר לאחר טעינת המוליכים במטענים $+|q|$ ו- $-|q|$, כך מסתבר שקיבולם גדול יותר. כל עוד נמנעת פריצת התווך הדיאלקטרי, ניתן לאגור

על המוליכים מטענים גדולים; אולם נזכור: אין הקיבול תלוי בגודל המטענים ובמתח שנוצר.

יחידות הקיבול

הנוסחה (14.22) מאפשרת להגדיר את יחידת הקיבול. הקיבול החשמלי של שני מוליכים שווה ליחידה אחת, אם בעקבות הטענת מטענים $+1\text{ C}$ ו- -1 C במוליכים נוצר ביניהם הפרש פוטנציאלים של 1 V . יחידה זו מכונה **פאראד (F)**: $1\text{ F} = 1 \frac{\text{C}}{\text{V}}$. מכיוון שמטען של קולון אחד גדול מאוד, גדול גם הקיבול ששיעורו **פאראד** אחד. לכן נפוץ יותר השימוש בחלקי היחידה הזאת: **מיקרופאראד** ($1\text{ }\mu\text{F} = 10^{-6}\text{ F}$) ו**פיקופאראד** ($1\text{ pF} = 10^{-12}\text{ F}$).

אפיון חשוב של מוליכים הוא קיבולם. קיבול המוליך יגדל, אם עבור אותו גודל מטען, שהוענק למוליכים, יקטן הפרש הפוטנציאלים ביניהם.

?

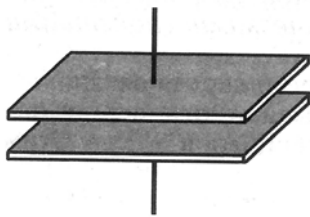
1. מהו קיבול חשמלי של שני מוליכים?
2. מדוע אין מושג הקיבול מתאים לגופים דיאלקטריים?
3. באילו יחידות נמדד הקיבול?

§102 קבלים

בכל מקלט רדיו ניתן למצוא מערכת מוליכים בעלי קיבולת חשמלית, והיא מכונה **קבל**. נלמד כיצד בנויות מערכות מסוג זה, ובמה תלויה הקיבולת החשמלית של מערכת כזו.

קבל

מערכת, המורכבת משני מוליכים, מכונה **קבל**, והיא בעלת קיבולת חשמלית. **קבל מורכב משני מוליכים, המופרדים על-ידי שכבת מבודד דקה יחסית למידה האורכית של המוליכים.**



ציור 203

הקבל המישורי הפשוט ביותר מורכב משני לוחות זהים מקבילים, הנמצאים במרחק קטן זה מזה (ציור 203). אם מטעני הלוחות שווים בגודלם ומנוגדים בסימנם, מתחילים קווי השדה החשמלי בלוח חיובי ומסתיימים בלוח השלילי (ציור 184). לכן כמעט כל השדה החשמלי מרוכז בתוך הקבל.

כדי לטעון קבל יש לחבר את הלוחות לקטבים של מקור המתח – למשל, סוללת מצברים. אפשר גם לחבר לוח אחד לקוטב של סוללה, כאשר הקוטב השני מוארק, והלוח האחר של הקבל מוארק אף הוא. על הלוח המוארק של הקבל ישאר מטען, הנגדי בסימנו ושווה בגודלו למטען שעל הלוח האחר. מטען השווה בגודלו למטענים אלה יועבר לאדמה.

לפי הגדרתו שווה מטען הקבל לערכו המוחלט של המטען שעל כל אחד הלוחות.

הקיבולת החשמלית של הקבל מוגדרת על-פי נוסחה (14.22).

השדות החשמליים של מטענים שמחוץ לקבל כמעט שאינם חודרים לתוכו, ואינם משפיעים על הפרש הפוטנציאלים שבין הלוחות. לכן אין הקיבולת החשמלית של קבל תלויה בהימצאות גופים טעונים אחרים לידו.

קיבולת קבל לוחות ישר

הצורה הגיאומטרית של קבל לוחות ישר מוגדרת במלואה על-ידי השטח S של הלוחות והמרחק d ביניהם. בערכים אלה תלויה גם הקיבולת החשמלית של הקבל. ככל שגדול שטח הלוחות, גדול גם המטען שאפשר לצבור בס: $q \sim S$. המתח בין הלוחות נמצא ביחס ישר למרחק ביניהם על-פי הנוסחה (14.21).

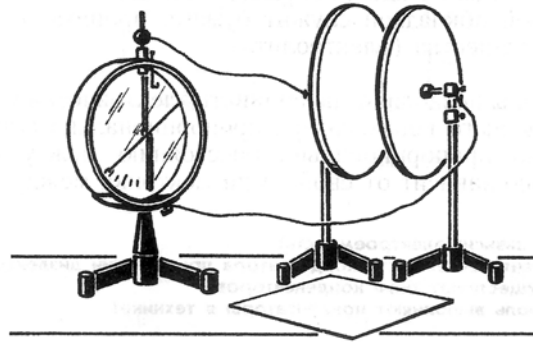
לכן הקיבולת היא:

$$(14.23) \quad C = \frac{q}{U} \sim \frac{S}{d}$$

הקיבולת תלויה גם בתכונות הדיאלקטריות של המבודד שבין הלוחות. מכיוון שעוצמת השדה החשמלי נחלשת בתוך מבודד, וכתולדה מכך קטן המתח שבין הלוחות (שוב, נוסחה 14.21), וגדלה הקיבולת החשמלית בנוכחות המבודד.

נבדוק בניסוי את הקשר בין המשתנים שבהם עסקנו. לצורך זה נשתמש בקבל, שהמרחק בין לוחותיו עשוי להשתנות, ובאלקטרומטר שגופו מוארק (ציור 204).

נחבר את הגוף והמוט המרכזי של האלקטרומטר עם לוחות הקבל, ונטען את הקבל: ניגע במקל טעון בלוח הקבל המחובר למוט. האלקטרומטר יציג את הפרש הפוטנציאלים בין הלוחות.



ציור 204

נגדיל את המרחק בין הלוחות, וניווכח שהפרש הפוטנציאלים גדל.

בהתאם להגדרת הקיבולת החשמלית (14.22), זו רֵאָה שהקיבולת קטנה. על-פי נוסחה (14.23) נמצאת הקיבולת ביחס הפוך למרחק שבין הלוחות, ותוצאת הניסוי תואמת מסקנה זו.

בלא לשנות את המרחק שבין הלוחות נכניס אל בין לוחות הקבל לוח, העשוי מחומר דיאלקטרי – למשל, זכוכית אורגנית – ונגלה שהפרש הפוטנציאלים קטן יותר.

אי לכך, וכפי שנלמד, במקרה זה גדלה הקיבולת החשמלית של קבל לוחות ישר. אם המרחק בין הלוחות d קטן מאוד, ושטח הלוחות S – די גדול, יוכל קבל מסוג זה, במידותיו הקטנות, להיות בעל קיבולת חשמלית גדולה. ברם קבל לוחות ישר בעל קיבולת של פאראד אחד ($1 F$) צריך להיות בעל לוחות ששטחם $S = 100 \text{ km}^2$, כאשר המרחק ביניהם $d = 1 \text{ mm}$.

סוגים שונים של קבלים

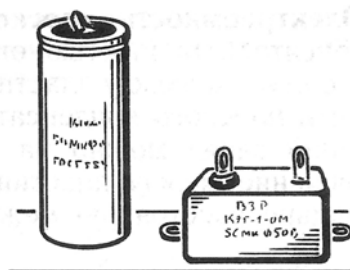
בהתאם לייעודם שונה המבנה של קבלים שונים. קבל נייר תעשייתי רגיל מורכב משתי רצועות של נייר אלומיניום, המבִּוֶדֶדוֹת זו מזו על-ידי רצועות נייר הספוגות

קיבול חשמלי

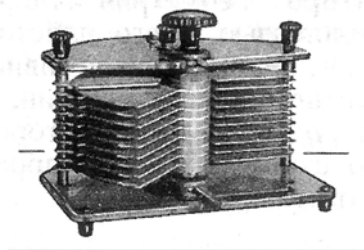
בפרפין. הרצועות מגולגלות זו עם זו לחבילה קטנה.

בתעשיית רדיו נמצאים בשימוש נפוץ קבלים בעלי קיבולת משתנה (ציור 205). קבל שכזה מורכב משתי מערכות של לוחות מתכת, היכולות לחפוף במידה משתנה זו את זו באמצעות סיבוב הידית. מבנה כזה מאפשר לשנות את שטח הלוחות החופפות, ובהתאם – לשנות את הקיבולת. כחומר דיאלקטרי בקבל זה משמש האוויר.

את ההגדלה המשמעותית בקיבולת בקבל אלקטרוליטי משיגים בהקטנת המרחק בין הלוחות (ציור 206). כמבודד הדיאלקטרי משמשת בהם שכבה דקה מאוד של אוקסיד, המצפה את אחד הלוחות (רצועת נייר האלומיניום). כלוח האחר משמש נייר, הספוג בתמיסת חומר מיוחד (אלקטרוליט).



ציור 206



ציור 205

הקבלים מאפשרים לצבור מטען חשמלי. קיבולת חשמלית של קבל לוח ישר נמצאת ביחס ישר לשטח הלוחות וביחס הפוך למרחק שביניהם; והיא תלויה גם בתכונות המבודד הדיאלקטרי הנמצא בין הלוחות.

?

1. במה תלויה קיבולת חשמלית?
2. כיצד אפשר לשנות את קיבולת הקבל בנוכחות החומר הדיאלקטרי?
3. אילו סוגים של קבלים קיימים?
4. איזה תפקיד נועד לקבלים בתחום ההנדסה?

קיבול חשמלי

§103 אנרגיה האצורה בקבל טעון יישומי קבלים

כמו בכל מערכת של גופים טעונים, אצורה גם בקבל אנרגיה. נחשב את האנרגיה האצורה בקבל לוחות, ששדה חשמלי אחיד בין לוחותיו.

אנרגיה האצורה בקבל טעון

כדי לטעון קבל, יש לבצע עבודה של הפרדה בין המטענים החיוביים לבין השליליים.

על-פי חוק שימור האנרגיה נאצרת עבודה זו כאנרגיה בקבל. כדי לוודא שקבל טעון נושא אנרגיה, אפשר לפרקו דרך מעגל, הכולל נורת להט המתוכננת לעבודה במתח השורר בין לוחות הקבל (ציור 207). בזמן פירוק הקבל נדלקת הנורה לרגע, והאנרגיה שהיתה אצורה בקבל מותמרת לחום ולאור.

נפתח נוסחה לחישוב האנרגיה האצורה בקבל לוחות.

עוצמת השדה, הנוצר על-ידי מטען שעל אחד מהלוחות, שווה ל- $E/2$, כאשר E – עוצמת השדה בקבל. בשדה האחיד של הלוח האחד נמצא מטען q , המפוזר על פני שטחו של הלוח האחר (ציור 208). בהתאם לנוסחה (14.14) בדבר האנרגיה הפוטנציאלית של מטען בשדה אחיד, שווה האנרגיה בשדה הקבל:

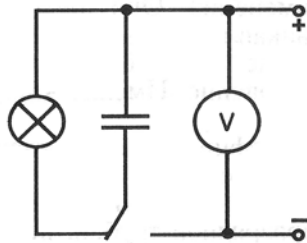
$$(14.24) \quad W_p = q \frac{E}{2} d$$

כאשר: q – מטען הקבל; d – המרחק בין הלוחות.¹

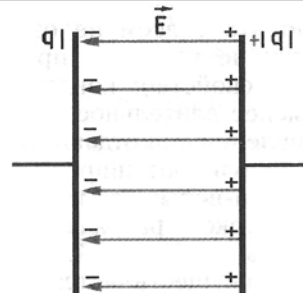
מכיוון ש- $Ed = U$, כאשר U – הפרש הפוטנציאלים בין לוחות הקבל, נקבל עבור האנרגיה האצורה בקבל טעון:

$$(14.25) \quad W_p = \frac{qU}{2}$$

¹ נוסחה (14.14) נכונה לאנרגיה, האצורה במטען נקודתי בשדה אחיד; אולם את המטען שעל הלוח אפשר לתאר באופן דמיוני כמחולק למטענים קטנים Δq . האנרגיה האצורה בכל חלק: $\Delta W_p = \Delta q \frac{E}{2} d$. נחבר את כל מנות האנרגיות, ונקבל את (14.24).



ציור 207



ציור 208

אנרגיה זו תהא שווה לעבודת השדה החשמלי במהלך התקרבות הלוחות עד למגע.

נציב את ביטוי הקיבול (14.22) בנוסחה (14.25) במקום הפרש הפוטנציאלים או המטען, ונקבל:

$$(14.26) \quad W_p = \frac{qU}{2} = \frac{q^2}{2C} = \frac{CU^2}{2}$$

ניתן להוכיח שנוסחאות אלה נכונות לא רק עבור קבל לוחות בלבד, אלא עבור כל קבל שהוא.

אנרגיית השדה החשמלי

בהתאם לתורת הפעולה מקרוב מרוכזת כל האנרגיה של פעילות הדדית בין גופים טעונים בשדה החשמלי. אי לכך אפשר לבטא את האנרגיה באמצעות המאפיין העיקרי של השדה: עוצמת השדה.

מכיוון שעוצמת השדה פרופורציונלית להפרש הפוטנציאלים $(U = Ed)$, אזי על-פי הנוסחה $W_p = \frac{CU^2}{2}$ נמצאת אנרגיית הקבל ביחס ישר לריבוע עוצמת השדה החשמלי הכלוא בתוכו: $W_p \sim E^2$.

יישומי קבלים

בדרך כלל אין אנרגיית הקבל גדולה במיוחד – לא יותר מכמה מאות ג'אולים – ואינה נשמרת לזמן רב עקב זליגת מטען בלתי נמנעת. לכן אין קבלים טעונים יכולים להחליף את המצברים כמקורות לאנרגיה חשמלית.

עם זאת יש לקבלים יישום רב כאוגרי אנרגיה בזכות תכונה חשובה שלהם: הקבל עשוי לאגור אנרגיה במשך זמן ארוך יחסית, ולשחרר אותה באופן כמעט

מיידית בהליך פריקה דרך מעגל שהתנגדותו נמוכה.

נורת הבזק הצמודה למצלמה מוזנת בזרם פריקת בזק של הקבל, שקודם לכן נטען אט-אט על-ידי סוללה מיוחדת. עירור מקורות האור הקוונטיים – לייזרים – נעשה על-ידי שפופרת גז, שעובר דרכה מטען בזמן קצר מאוד; זה המטען שמשחרר במהלך הפריקה של סוללת קבלים בעלת קיבול רב.

אולם היישום העיקרי לקבלים נמצא במכשיר הרדיו.

האנרגיה האצורה בקבל נמצאת ביחס ישר לקיבול החשמלי ולריבוע המתח שבין לוחות הקבל. כל האנרגיה הזאת מרוכזת בשדה חשמלי. אנרגיית השדה החשמלי נמצאת ביחס ישר לריבוע עוצמת השדה.

?

1. מהי האנרגיה האצורה בקבל טעון?

2. מנו את היישומים העיקריים של הקבלים.

דוגמאות לפתרון תרגילים

קיבול חשמלי הוא הנושא האחרון בפרק האלקטרוסטטיקה. לפתרון תרגילים בנושא זה דרוש כל המידע שנלמד עד כה: חוק שימור המטען החשמלי; מושגי עוצמת השדה והפוטנציאל; תופעות במוליכים בשדה חשמלי; שינוי עוצמת השדה בתוך החומר הדיאלקטרי; וחוק שימור האנרגיה בתופעות הנוגעות בשדה החשמלי. הנוסחה העיקרית בפתרון תרגילי הקיבול היא (14.22).

1. הקיבול החשמלי של קבל הוא $C = 5 \text{ pF}$. איזה מטען נמצא על כל אחד מהלוחות, אם ידוע שהפרש הפוטנציאלים ביניהם הוא $U = 1000 \text{ V}$?

פתרון

בהתאם לנוסחה (14.22) הקיבול החשמלי של קבל הוא: $C = \frac{q}{U}$. מכאן נמצא

את המטען על כל לוח $q = CU$:

$$q = 5 \cdot 10^{-12} \cdot 1000 \text{ C} = 5 \cdot 10^{-9} \text{ C}$$

2. מטען הקבל הוא $q = 3 \cdot 10^{-8} \text{ C}$ והקיבול שלו $C = 10 \text{ pF}$. מצאו את מהירות האלקטרון, העוזב לוח אחד של הקבל, בעת הפגיעה בלוח האחר. המהירות

חוקי הזרם הישר – תרגילים ותקציר

ההתחלתית של האלקטרון שווה לאפס, והמטען הסגולי שלו שווה ל:

$$\frac{e}{m} = 1.76 \cdot 10^{11} \frac{C}{kg}$$

פתרון

האנרגיה הקינטית ההתחלתית של האלקטרון שווה לאפס, והאנרגיה הפוטנציאלית היא $W_p = eU$, כאשר: U – המתח שבין לוחות הקבל. האנרגיה הקינטית הסופית של האלקטרון שווה ל- $\frac{mv^2}{2}$, והאנרגיה הפוטנציאלית שווה לאפס (אם קובעים את רמת האפס של האנרגיה הפוטנציאלית על הלוח האחר).

$$eU = \frac{mv^2}{2} \quad \text{קיבול הקבל הוא } C = \frac{q}{U} \\ \text{נחלץ מפה את המתח } U, \text{ ונציב אותו בנוסחה הקודמת: } \frac{mv^2}{2} = \frac{eq}{C}$$

מכאן נקבל סופית:

$$U = \sqrt{\frac{2eq}{mC}} \approx 1 \cdot 10^7 \frac{m}{sec}$$

מקבץ תרגילים 18

1. הפרש הפוטנציאלים בין לוחות הקבל בעל קיבול $0.1 \mu F$ השתנה ב- $175 V$. מצאו את השינוי במטען הקבל.

2. למרחב שבין לוחות קבל נכנס אלקטרון במהירות של $2 \cdot 10^7 \frac{m}{sec}$, המכוונת במקביל ללוחות. לאיזה מרחק בכיוון הלוח הטעון חיובית יסטה האלקטרון במשך המעוף בתוך הקבל, אם אורך הלוחות $0.5 m$ והפרש הפוטנציאלים שווה ל- $200 V$? המרחק בין הלוחות $0.02 m$, והיחס של מטען האלקטרון למסתו:

$$\frac{e}{m} = 1.76 \cdot 10^{11} \frac{C}{kg}$$

3. קבל לוחות ישר נטען בעזרת מקור מתח $U = 200 V$. לאחר מכן ניתקו את הקבל. מה יהיה המתח בין הלוחות U_1 , אם נגדיל את המרחק ביניהם מ- $d = 0.2 mm$ ל- $d_1 = 0.7 mm$?

תקציר פרק 14

מטענים נקודתיים נייחים q_1 ו- q_2 פועלים בכוח זה על זה בריק על-פי חוק קולון:

$$F = k \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{r^2}$$

כאשר: המקדם $k = 9 \cdot 10^9 \frac{N \cdot m^2}{C^2}$. יחידות המטען: קולון.

המטען נשמר במערכת סגורה של גופים טעונים.

המטענים פועלים באמצעות השדה החשמלי. עוצמת השדה קובעת את הכוח הפועל על המטען: $\vec{F} = q\vec{E}$. עוצמות השדות, הנוצרים על-ידי מטענים בודדים, מתחברות בצורה וקטורית (עקרון הסופרפוזיציה).

עוצמת השדה של מטען נקודתי בריק שווה:

$$E = k \frac{|q|}{r^2}$$

במוליכים נמצאים מטעני חשמל חופשיים. עוצמת השדה והמטען החשמלי בתוך המוליך שווים לאפס.

בתוך החומר הדיאלקטרי קשורים המטענים לאטומים או למולקולות. בתוך דיאלקטרי נחלש השדה החשמלי.

השדה האלקטרוסטטי הוא פוטנציאלי, דהיינו העבודה אינה תלויה בצורת המסלול של המטען, והיא שווה לשינוי האנרגיה הפוטנציאלית בסימן נגדי: $A = -\Delta W_p$

האנרגיה הפוטנציאלית של המטען בשדה אחיד $W_p = qEd$, כאשר: d – המרחק מהמישור שבו שווה האנרגיה הפוטנציאלית לאפס.

פוטנציאל השדה החשמלי הוא היחס בין האנרגיה הפוטנציאלית של המטען הנמצא בשדה לבין גודל המטען:

$$\varphi = \frac{W_p}{q}$$

הפרש הפוטנציאלים (המתח) בין שתי נקודות שווה ליחס בין עבודת השדה בהעברת המטען מנקודה התחלתית לנקודה סופית לבין גודל המטען:

חוקי הזרם הישור – חגילים ותקציר

$$U = \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A}{q}$$

הפרש הפוטנציאלים מבוטא בוולטים: $1V = \frac{1J}{1C}$.

עוצמת השדה קשורה להפרש הפוטנציאלים בנוסחה: $E = \frac{U}{\Delta d}$, כאשר U –

הפרש הפוטנציאלים בין שתי נקודות על קו שדה אחד, הנמצאות במרחק קטן Δd זו מזו.

את יכולת המוליכים לאגור מטען חשמלי מאפיינים על-ידי קיבול חשמלי. הקיבול החשמלי של שני מוליכים שווה:

$$C = \frac{q}{U}$$

כאשר: q – מטען של אחד המוליכים (על המוליך השני נמצא מטען שווה בגודלו והפוך בסימנו); U – הפרש הפוטנציאלים בין המוליכים.

קיבול חשמלי נמדד ביחידות של פאראד: $1F = \frac{1C}{1V}$.

המטען המרבי נאגר בקבל – מערכת של שני מוליכים, אשר מידותיהם האורכיות גדולות בהרבה מהמרחק שביניהם.

אנרגיית הקבל הטעון היא $W_p = \frac{qU}{2}$.

השקענו זמן רב יחסית ללימוד החשמל, אולם הספקנו לנתח רק את המקרה הפשוט ביותר של גופים טעונים נייחים: זאת תורת האלקטרוסטטיקה. האם ראוי היה לתת תשומת לב כה רבה לאלקטרוסטטיקה? אכן, כדאי היה: הגדרנו את המושגים החשובים ביותר, שמשמשים בהם בתורת האלקטרודינמיקה: מטען חשמלי, שדה חשמלי, פוטנציאל והפרש פוטנציאלים, קיבול, אנרגיית השדה החשמלי. הבנת המהות של מושגים בסיסיים אלה קלה במקרה פרטי פשוט – בזה אשר עסקנו – קלה יותר מאשר במקרה כללי של מטענים נעים.

נעבור עתה ללימוד התופעות האלקטרומגנטיות המתרחשות בתנועת מטענים חשמליים.