עודכן לאחרונה: November 1, 2026

🗺️ מפת דרכים לארבע שנים · שנה 2, סתיו · 🧱 מחשבון מובנה

על הקורס

לקורס החינמי הזה יש 10 יחידות ו-6 מעבדות. אלה המספרים האמיתיים, לא תוכנית ארוכה יותר שקוצרה.

בדיקה היא מספר או תוצאת קוד בעמוד קורס שסקריפט מחשב מחדש לפני הפרסום. המספר המודפס והמספר שחושב מחדש חייבים להתאים.

זהו מתווה של קורס חינמי ללימוד עצמי שנכתב על ידי Saving Planets. הוא אינו קורס אוניברסיטאי, אינו מעניק נקודות זכות אקדמיות, ואף מוסד לימודים אינו מעורב בו.

היקפו תואם את הסמסטר השני של פיזיקה אקדמית מבוססת חשבון אינפיניטסימלי (חשמל ומגנטיות, עם מבט ראשון באופטיקה). הוא מבוסס על הנושאים והעומק של MIT OpenCourseWare 8.02, Ph1b ו-Ph1c של Caltech, Georgia Tech PHYS 2212 והספר החינמי OpenStax University Physics Volume 2, שאליו אנו מקשרים לאורך כל הדרך. אף אחד מהמחברים או המוסדות האלה אינו תומך בדף זה.

מה שאנחנו מוסיפים: כל יחידה קשורה לעבודה אמיתית באנרגיה נקייה או בתצפית על כדור הארץ עם מקור ציבורי מצוטט (גנרטורים, פאנלים סולאריים, מכוניות חשמליות, רשת החשמל, השדה המגנטי של כדור הארץ, מזג אוויר בחלל, חיישני לוויין), כל מספר בדף מחושב מחדש בסקריפט בדיקה לפני פרסום, ולכל מעבדה יש גרסת PhET חינמית וגרסה ביתית בטוחה במתח נמוך.

עברו עליו לפי הסדר. בכל יחידה יש מטרות, רעיונות מרכזיים, משוואות, דוגמאות צעד אחר צעד, תרגול עם תשובות מלאות, טעויות נפוצות, כרטיסיות ובוחן. ההתקדמות שלכם נשמרת רק בדפדפן הזה.

איך הקורס הזה עוזר להציל את כדור הארץ

כמעט כל החשמל הנקי הוא אלקטרומגנטיות בפעולה. טורבינות רוח ומים מסובבות גנרטורים הפועלים לפי חוק פאראדיי, פאנלים סולאריים דוחפים מטען בעזרת שדות חשמליים מובנים, מכוניות חשמליות הופכות זרם לתנועה בכוחות מגנטיים, והרשת משתמשת בשנאים ובמתח גבוה כדי להעביר הספק עם הפסדים קטנים.

גלים אלקטרומגנטיים הם גם הדרך שבה אנו צופים בכוכב: לוויינים כמו Landsat 9 ו-GOES-19 קוראים אור נראה, אינפרה-אדום ומיקרוגל כדי למפות גידולים, יערות, מים וסופות. והשדה המגנטי של כדור הארץ מגן עלינו, בעוד מזג אוויר בחלל מהשמש יכול להשרות זרמים בקווי חשמל. כל יחידה מסתיימת בקטע קצר עם מקורות. ערכים שאינם ממקור מסומנים כערכים לדוגמה.

למורים

אפשר ללמד את הקורס הזה, או לתת לתלמיד לעבור אותו לבד. הוא חינם. Saving Planets לא נותנת ציון ולא נקודות זכות.

- העמוד הזה הוא כל הקורס: 10 יחידות ו-6 מעבדות (PHYS 210 + PHYS 210L).
- תכננו 15 שבועות, בערך 6 עד 9 שעות בשבוע, כולל שבועות המעבדה.
- עקבו אחרי לוח 15 השבועות. קראו את היחידה, פתרו על הנייר, ואז פתחו את התשובה. בשבוע מעבדה עשו את המעבדה או את הגרסה הביתית.
- בדיקה היא מספר או תוצאת קוד בעמוד שסקריפט מחשב מחדש לפני הפרסום. המספר שרואים והמספר שחושב מחדש חייבים להתאים.
- השתמשו בהדפסת העמוד, או הורידו את מדריך הלימוד ב-PDF. דף הנוסחאות נמצא לקראת הסוף.
- שאלו: איך היחידה הזו עוזרת לאנשים ולכוכב? בכל יחידה יש תיבה ירוקה עם עובדה ומקור.
- העתיקו את תבנית המדריך למורה וכתבו את שם הכיתה, הזמן שיש לכם, והשאלות שתשאלו. פתיחת תבנית המדריך למורה

לפני שמתחילים

ידע מוקדם

- פיזיקה I: כוחות, אנרגיה, תנע, תנועה מעגלית ותנודות.
- חשבון אינפיניטסימלי I ו-II: נגזרות, אינטגרלים, וגדילה ודעיכה מעריכיות.
- וקטורים: רכיבים, מכפלה סקלרית ווקטורית (נלמדים בקצרה כשצריך).
- חשבון אינפיניטסימלי III עוזר עם חוקי גאוס ואמפר בצורה אינטגרלית אך אינו נדרש.

איך ללמוד

- שרטטו קודם את השדה או את המעגל. רוב הטעויות בחשמל ומגנטיות הן טעויות סימן או כיוון.
- פתרו קודם בסמלים, אחר כך הציבו מספרים ביחידות SI, ובדקו את יחידות התשובה.
- השתמשו בסימטריה: לפני שמפעילים את חוק גאוס או אמפר, שאלו לאן השדה חייב להצביע ובמה הוא יכול לתלות.
- פתרו כל תרגיל על הנייר לפני שאתם פותחים את התשובה.
- חזו, ואז בדקו בסימולציית PhET. תחזית שגויה שתיקנתם נזכרת טוב יותר מניחוש נכון.
- עשו שוב את הבחנים כעבור כמה ימים. תרגול מרווח עדיף על מפגש ארוך אחד.

מה צריך

- מחשב או טאבלט לסימולציות PhET החינמיות (הן רצות בדפדפן).
- מולטימטר דיגיטלי וכמה סוללות AA עם תושבת סוללות (מתח נמוך בלבד).
- ערכה קטנה של נגדים (100 Ω עד 10 kΩ), קבל אלקטרוליטי של 100 µF או יותר במתח נקוב גבוה ממתח הסוללה, חוטי גישור או מטריצה.
- סמארטפון עם אפליקציית מגנטומטר (ברוב הטלפונים יש חיישן), מצפן קטן, כמה מגנטים למקרר.
- קופסה שקופה מזכוכית או פלסטיק עם מים, מצביע לייזר מדרגה 2 ומטה או אלומה צרה של פנס, מד-זווית.
- תוכנת גיליון אלקטרוני לגרפים ולהתאמות.

לוח זמנים מוצע ל־15 שבועות

כ־6 עד 9 שעות בשבוע: קריאה, תרגילים, ובשבועות המעבדה גם המעבדה.

שבוע	יחידה	נושאים	קריאה
1	מטען, חוק קולון ושדות חשמליים	מטען, חוק קולון, סופרפוזיציה	OpenStax UP2 5.1–5.3
2	מטען, חוק קולון ושדות חשמליים	שדות חשמליים, מטען רציף, קווי שדה; מעבדה A	UP2 5.4–5.6
3	חוק גאוס	שטף וחוק גאוס; מוליכים	UP2 6.1–6.4
4	פוטנציאל חשמלי וקיבול	אנרגיה פוטנציאלית, פוטנציאל, משטחים שווי פוטנציאל	UP2 7.1–7.5
5	פוטנציאל חשמלי וקיבול	קיבול, אנרגיה, דיאלקטריים; מעבדה B	UP2 8.1–8.4
6	זרם, התנגדות ומעגלי זרם ישר	זרם, התנגדות, הספק	UP2 9.1–9.5
7	זרם, התנגדות ומעגלי זרם ישר	מעגלי זרם ישר, כללי קירכהוף, מעגלי RC; מעבדה C	UP2 10.1–10.5
8	שדות וכוחות מגנטיים	כוח מגנטי, מסלולי חלקיקים, מנועים; תרגול לבחינת אמצע	UP2 11.1–11.5
9	מקורות של שדות מגנטיים: ביו–סבאר ואמפר	ביו–סבאר, חוק אמפר, סולנואידים; מעבדה D	UP2 12.1–12.7
10	השראה אלקטרומגנטית: פאראדיי ולנץ	חוקי פאראדיי ולנץ, גנרטורים; מעבדה E	UP2 13.1–13.7
11	השראות, מעגלי RL ו-LC	השראות, מעגלי RL ו-LC	UP2 14.1–14.6
12	מעגלי זרם חילופין, שנאים ורשת החשמל	מעגלי חילופין, תהודה, הספק, שנאים	UP2 15.1–15.6
13	משוואות מקסוול, גלים אלקטרומגנטיים ואופטיקה	משוואות מקסוול, גלים אלקטרומגנטיים, אנרגיה והספקטרום	UP2 16.1–16.5
14	משוואות מקסוול, גלים אלקטרומגנטיים ואופטיקה	אופטיקה: החזרה, שבירה, קיטוב, עדשות; מעבדה F	UP3 1.1–1.7, 2.4
15	חזרה	חזרה וסדרת תרגול מסכמת	כל היחידות

ההתקדמות שלכם

סמנו יחידות ומעבדות כשאתם מסיימים אותן, ועשו את הבחנים. ההתקדמות והציונים נשמרים רק בדפדפן הזה ולעולם לא נשלחים אלינו.

יחידות

מטען, חוק קולון ושדות חשמליים

מטען חשמלי, מוליכים ומבודדים, חוק קולון, השדה החשמלי של מטענים נקודתיים ומטען רציף, קווי שדה ומטענים הנעים בשדות.

מטרות הלמידה

בסוף היחידה הזו תוכלו:

- השתמשו בחוק קולון עם וקטורים וסופרפוזיציה.
- מצאו את השדה החשמלי של מטענים נקודתיים ושל התפלגויות מטען פשוטות.
- שרטטו קווי שדה וקראו אותם.
- מצאו את הכוח והתאוצה של מטען בשדה.

מושגי מפתח

- למטען שני סימנים, הוא נשמר, והוא מקוונטט ביחידות של $e = 1.602 \times 10^{-19}$ C.
- חוק קולון: $F = k|q_1 q_2|/r^2$, לאורך הקו בין המטענים; מטענים זהים דוחים זה את זה.
- השדה החשמלי $E = F/q$ הוא הכוח ליחידת מטען. מטען נקודתי יוצר $E = kq/r^2$, המצביע הרחק ממטען חיובי.
- שדות מתחברים כווקטורים (סופרפוזיציה). עבור מטען רציף, סוכמים $dE = k\,dq/r^2$ באינטגרל.
- מטען בשדה חש $F = qE$, ולכן אלקטרון מואץ בכיוון הפוך ל-E.

משוואות מפתח

$$F = k\frac{|q_1 q_2|}{r^2}, \quad k = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}$$

F=k(|q_1q_2|)/(r^2), k=1⁄4π_0

חוק קולון

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}, \quad E = \frac{k|q|}{r^2}$$

E=(F)/(q), E=(k|q|)/(r^2)

שדה חשמלי של מטען נקודתי

$$\vec{E} = \int \frac{k\,dq}{r^2}\hat{r}$$

E=(k dq)/(r^2) r

מטען רציף

$$\vec{F} = q\vec{E}$$

F=q E

כוח על מטען

דוגמאות פתורות שלב אחר שלב

דוגמה 1.1 מטענים של +3.0 μC ו-−5.0 μC נמצאים במרחק 0.20 m זה מזה. מצאו את הכוח ביניהם.

1. $F = k|q_1 q_2|/r^2 = 8.988 \times 10^9 \times (3.0 \times 10^{-6})(5.0 \times 10^{-6})/0.20^2$.
2. סימנים הפוכים נמשכים.

תשובה: 3.37 N, משיכה.

דוגמה 1.2 מצאו את השדה במרחק 0.30 m ממטען נקודתי של 2.0 nC.

1. $E = kq/r^2 = 8.988 \times 10^9 \times 2.0 \times 10^{-9}/0.09$.

תשובה: ≈ 200 N/C, מצביע הרחק מהמטען.

דוגמה 1.3 מטענים של +4.0 nC ו-−4.0 nC נמצאים במרחק 0.10 m. מצאו את השדה בנקודת האמצע.

1. כל מטען נמצא במרחק 0.05 m ונותן $E = kq/r^2 = 14380$ N/C.
2. שני השדות מצביעים לעבר המטען השלילי, ולכן הם מתחברים.

תשובה: 28760 N/C (2.88×10^4 N/C) לעבר המטען השלילי.

תרגילים

פתרו כל אחד קודם על נייר, ואז בדקו.

1. מצאו את הכוח החשמלי בין הפרוטון לאלקטרון במימן ($r = 5.29 \times 10^{-11}$ m).

   $F = ke^2/r^2 \approx 8.24 \times 10^{-8}$ N.

2. פי כמה חזקה הדחייה החשמלית בין שני פרוטונים מהמשיכה הכבידתית ביניהם?

   $ke^2/(Gm_p^2) \approx 1.23 \times 10^{36}$, ללא תלות במרחק.

3. אלקטרון נמצא בשדה של 200 N/C. מצאו את הכוח והתאוצה.

$a = F/m_e \approx 3.52 \times 10^{13}\ m/s^2$; $F = eE = 3.20 \times 10^{-17}\ N$, בכיוון הפוך ל-E.

4. היכן מתאפס השדה בין +q ל-4q+ שמרחקן d?

$kq/x^2 = 4kq/(d - x)^2$ נותן $x = d/3$ מ-q+.

תפיסות שגויות נפוצות

מיתוס: מטען גדול יותר חש כוח גדול יותר ממטען קטן יותר.

בפועל: החוק השלישי של ניוטון: הכוחות שווים והפוכים.

מיתוס: קווי שדה הם המסלולים שמטענים עוקבים אחריהם.

בפועל: הם מראים את כיוון הכוח; מטען נע יכול לעזוב קו מעוקל.

מיתוס: השדה הוא אפס בכל מקום שאין בו מטען.

בפועל: מרחב ריק יכול להכיל שדה חזק; רק צפיפות המטען היא אפס שם.

כרטיסיות

מטען יסודי

$e = 1.602 \times 10^{-19}\ C$.

חוק קולון

$F = k|q_1q_2|/r^2$.

שדה חשמלי

$E = F/q$.

שדה של מטען נקודתי

$E = kq/r^2$.

סופרפוזיציה

שדות של כמה מטענים מתחברים כווקטורים.

קווי שדה

מתחילים במטען + ומסתיימים במטען −; צפוף יותר פירושו חזק יותר.

בוחן לבדיקה עצמית

1. הכפלת המרחק בין שני מטענים משנה את הכוח פי…

- 2×
- ½×
- ¼×

×4

×¼. ריבוע הפוך.

2. השדה של מטען נקודתי חיובי מצביע…

לעברו

הרחק ממנו

במעגלים

בשום מקום

הרחק ממנו. כיוון הכוח על מטען בוחן חיובי.

3. אלקטרון בשדה המצביע מזרחה מואץ…

מזרחה

מערבה

צפונה

בכלל לא

מערבה. $F = qE$ עם $q < 0$.

4. יחידת ה-SI של שדה חשמלי היא…

N/C

C/N

J

T

N/C. כוח ליחידת מטען (וגם V/m).

לנסות שוב את הבוחן

איך זה עוזר להציל את כדור הארץ

תא סולארי פועל משום שאור השמש משחרר מטענים ששדה חשמלי מובנה דוחף אז זה מזה. משרד האנרגיה האמריקאי מסביר שאור שמש שנבלע בתא PV יוצר מטענים חשמליים שנעים בתגובה לשדה חשמלי פנימי, וכך זורם חשמל. כל פאנל סולארי הוא יריעה של שדות חשמליים מתוכננים בקפידה.

ב־Saving Planets: פיזיקה I

מקורות: OpenStax UP2, 5.3 Coulomb’s law (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/5-3-coulombs-law) · U.S. DOE: How does solar work? (https://www.energy.gov/eere/solar/how-does-solar-work)

מקורות לימוד חינמיים

- OpenStax UP2, 5.3 Coulomb’s law (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/5-3-coulombs-law): פרק מספר לימוד חינמי.
- OpenStax UP2, 5.4 Electric field (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/5-4-electric-field): שדות וסופרפוזיציה.
- OpenStax UP2, 5.5 Fields of charge distributions (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/5-5-calculating-electric-fields-of-charge-distributions): אינטגרלים עבור E.
- PhET: Coulomb’s Law (https://phet.colorado.edu/en/simulations/coulombs-law): אינטראקטיבי.

צפו בהרצאה

Electric Fields (https://oyc.yale.edu/physics/phys-201/lecture-2) (באנגלית)

Ramamurti Shankar, PHYS 201 Fundamentals of Physics II, Open Yale Courses. רישיון: CC BY-NC-SA 3.0 US (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/us/) · תנאי שימוש (https://oyc.yale.edu/terms). הקישור מיועד ללימוד חינמי בלבד; Saving Planets אינו קשור לאוניברסיטה זו ואינו נתמך על ידה.

סיימתי את היחידה הזו

חוק גאוס

שטף חשמלי, חוק גאוס ושימוש בסימטריה למציאת שדות של כדורים, קווים ומשטחים; מוליכים בשיווי משקל אלקטרוסטטי.

מטרות הלמידה

בסוף היחידה הזו תוכלו:

- חשבו שטף חשמלי דרך משטח.
- נסחו את חוק גאוס ובחרו משטח גאוס המתאים לסימטריה.
- מצאו שדות של מטען כדורי, גלילי ומישורי.
- הסבירו מדוע השדה בתוך מוליך הוא אפס והמטען יושב על פניו.

מושגי מפתח

- השטף Φ = ∮E·dA סופר קווי שדה דרך משטח.
- חוק גאוס: השטף נטו היוצא מכל משטח סגור שווה למטען הכלוא חלקי ε_0.
- חוק גאוס תמיד נכון אך שימושי רק כשהסימטריה הופכת את E לקבוע על המשטח: כדורים, קווים ארוכים, משטחים גדולים.
- מחוץ לכדור טעון באופן אחיד, השדה זהה לשדה של מטען נקודתי במרכז.
- במוליך בשיווי משקל E = 0 בפנים, מטען עודף יושב על פני השטח, ו-E ממש מחוץ לו ניצב לפני השטח.

משוואות מפתח

$$\Phi_E = \oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{Q_{\text{enc}}}{\varepsilon_0}$$

_E= E· d A=_enc_0

חוק גאוס

$$E = \frac{\lambda}{2\pi\varepsilon_0 r}$$

E=()/(2π_0 r)

קו מטען ארוך

$$E = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0}$$

E=(σ)/(2_0)

משטח מטען גדול

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_0}$$

דוגמאות פתורות שלב אחר שלב

דוגמה 2.1 משטח סגור מקיף מטען של 1.0 nC. מצאו את השטף נטו.

1. $\Phi = Q/\varepsilon_0 = 1.0 \times 10^{-9}/8.854 \times 10^{-12}$; הצורה אינה משנה.

תשובה: $\approx 113\ \text{N·m}^2/\text{C}$.

דוגמה 2.2 תיל ארוך נושא 2.0 nC למטר. מצאו את E ב-0.10 m.

1. השתמשו בגליל: $E(2\pi rL) = \lambda L/\varepsilon_0$, ולכן $E = \lambda/(2\pi\varepsilon_0 r) = 2k\lambda/r$.
2. $E = 2 \times 8.988 \times 10^{9} \times 2.0 \times 10^{-9}/0.10$.

תשובה: $\approx 360\ \text{N/C}$, מצביע רדיאלית החוצה.

דוגמה 2.3 משטח גדול נושא $\sigma = 5.0\ \mu\text{C/m}^2$. מצאו את E בקרבתו.

1. קופסת גלולה החוצה את המשטח: $2EA = \sigma A/\varepsilon_0$.

תשובה: $E = \sigma/(2\varepsilon_0) \approx 2.82 \times 10^{5}\ \text{N/C}$, זהה בכל מרחק סמוך למשטח.

תרגילים

פתרו כל אחד קודם על נייר, ואז בדקו.

1. מטען של 1.0 μC יושב על כדור מתכת של 0.10 m. מצאו את E במרחק 0.50 m מהמרכז וב-0.05 m.

   בחוץ: $kQ/r^2 = 3.60 \times 10^{4}\ \text{N/C}$. בתוך המוליך: 0.

2. מדוע מכונית מגינה עליכם מברק?

   המטען נשאר על פני המתכת החיצוניים, ולכן השדה בפנים קטן (כלוב פאראדיי).

3. קובייה מקיפה דיפול. מהו השטף נטו?

   אפס: המטען הכלוא הוא אפס.

4. כיצד יורד E של קו מטען עם המרחק?

   כמו $1/r$, לאט יותר מה-$1/r^2$ של מטען נקודתי.

תפיסות שגויות נפוצות

מיתוס: שטף אפס פירושו שדה אפס בכל מקום על המשטח.

בפועל: רק הסכום הוא אפס; השדה יכול להיכנס מצד אחד ולצאת מצד אחר.

מיתוס: חוק גאוס עובד רק למטענים סימטריים.

בפועל: הוא תמיד מתקיים; הסימטריה היא שהופכת אותו לקל לשימוש.

מיתוס: מטענים מחוץ למשטח משנים את השטף.

בפועל: הם משנים את E על המשטח אך מוסיפים שטף נטו אפס.

כרטיסיות

שטף חשמלי

$\Phi = \oint E \cdot dA$.

חוק גאוס

$\Phi = Q_{enc}/\varepsilon_0$.

קו מטען

$E = \lambda/(2\pi\varepsilon_0 r)$.

משטח מטען

$E = \sigma/(2\varepsilon_0)$.

מוליך

E = 0 בפנים; מטען על פני השטח.

כלוב פאראדיי

מוליך סגור ממסך את פנימו.

בוחן לבדיקה עצמית

1. השטף נטו דרך משטח סגור תלוי ב...

צורתו

המטען הכלוא

שטחו

מטענים חיצוניים

המטען הכלוא. Q_{enc}/ε_0.

2. בתוך מוליך בשיווי משקל, E הוא…

מקסימלי

אפס

kQ/r^2

σ/ε_0

אפס. מטענים חופשיים מתסדרים מחדש עד ש-E = 0.

3. E ליד משטח טעון גדול משתנה עם המרחק כמו…

$1/r^2$

$1/r$

קבוע

r

קבוע. $\sigma/(2\varepsilon_0)$.

4. משטח גאוס הטוב ביותר לתיל ארוך הוא…

כדור

קובייה

גליל קו-צירי

דיסקה שטוחה

גליל קו-צירי. מתאים לסימטריה.

לנסות שוב את הבוחן

איך זה עוזר להציל את כדור הארץ

לחוק גאוס יש תאום מגנטי: השטף המגנטי נטו דרך כל משטח סגור הוא אפס, כי אין מונופולים מגנטיים. השדה של כדור הארץ הוא דוגמה טובה. ה-National Centers for Environmental Information של NOAA מציינים שיותר מ-90% מהשדה הנמדד על

פני השטח נוצר בליבה החיצונית של כדור הארץ. כל קו שדה שעוזב את הכוכב חוזר אליו.

ב־Saving Planets: מזג אוויר בחלל

מקורות: OpenStax · NOAA NCEI: Geomagnetism frequently asked questions (https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/faqgeom.shtml) · UP2, 6.3 Applying Gauss’s law (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/6-3-applying-gausss-law)

מקורות לימוד חינמיים

- OpenStax UP2, 6.2 Explaining Gauss’s law (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/6-2-explaining-gausss-law): השטף והחוק.
- OpenStax UP2, 6.3 Applying Gauss’s law (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/6-3-applying-gausss-law): כדורים, קווים, משטחים.
- OpenStax UP2, 6.4 Conductors in equilibrium (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/6-4-conductors-in-electrostatic-equilibrium): מוליכים.
- MIT OpenCourseWare 8.02 Physics II: Electricity and Magnetism (https://ocw.mit.edu/courses/8-02-physics-ii-electricity-and-magnetism-spring-2019/): הרצאות ומטלות.

צפו בהרצאה

Gauss's Law I (באנגלית) (https://oyc.yale.edu/physics/phys-201/lecture-3)

Ramamurti Shankar, PHYS 201 Fundamentals of Physics II, Open Yale Courses. רישיון: CC BY-NC-SA 3.0 US (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/us/) · תנאי שימוש (https://oyc.yale.edu/terms). הקישור מיועד ללימוד חינמי בלבד; Saving Planets אינו קשור לאוניברסיטה זו ואינו נתמך על ידה.

סיימתי את היחידה הזו

פוטנציאל חשמלי וקיבול

אנרגיה פוטנציאלית ופוטנציאל, משטחים שווי פוטנציאל, מציאת E מ-V, קבלים בטור ובמקביל, אנרגיה אגורה ודיאלקטריים.

מטרות הלמידה

בסוף היחידה הזו תוכלו:

- חשבו פוטנציאל ואנרגיה פוטנציאלית של מטענים נקודתיים.
- קשרו בין E ל-V: E = −dV/dx.
- מצאו קיבול וצרפו קבלים.
- חשבו אנרגיה אגורה ואת השפעת הדיאלקטרי.

מושגי מפתח

- הפוטנציאל V הוא אנרגיה פוטנציאלית ליחידת מטען (וולט = ג'אול לקולון). רק הפרשים חשובים.
- מטען נקודתי נותן V = kq/r; פוטנציאלים מתחברים כמספרים, לא כווקטורים.
- השדה מצביע במורד הפוטנציאל: E = −dV/dx. משטחים שווי פוטנציאל ניצבים לקווי השדה.
- קבל אוגר מטען Q = CV. לקבל לוחות מקבילים יש C = ε₀A/d.
- אנרגיה אגורה U = ½CV². דיאלקטרי עם קבוע κ מכפיל את C ב-κ.
- קבלים במקביל מתחברים; בטור מתחברים ההפכיים.

משוואות מפתח

$$V = \frac{kq}{r}, \quad \Delta U = q\,\Delta V$$

V=kq/r, Δ U=q Δ V

פוטנציאל של מטען נקודתי

$$E_x = -\frac{dV}{dx}$$

E_x=-dV/dx

שדה מתוך פוטנציאל

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{\kappa \varepsilon_0 A}{d}$$

C=Q/V=(_0A)/(d)

קבל לוחות מקבילים

$$U = \tfrac{1}{2} C V^2$$

U=12CV^2

אנרגיה אגורה

$$C_{\parallel} = C_1 + C_2, \quad \frac{1}{C_s} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$$

C_=C_1+C_2, 1C_s=1C_1+1C_2

צירופים

דוגמאות פתורות שלב אחר שלב

דוגמה 3.1 מצאו את הפוטנציאל במרחק 0.30 m ממטען של 2.0 nC.

1. V = kq/r = 8.988 × 10⁹ × 2.0 × 10⁻⁹/0.30.

תשובה: ≈ 59.9 V.

דוגמה 3.2 אלקטרון מתחיל ממנוחה ועובר הפרש פוטנציאל של 100 V. מצאו את מהירותו.

1. eΔV = ½mv².
2. v = √(2 × 1.602 × 10⁻¹⁹ × 100/9.109 × 10⁻³¹).

תשובה: ≈ 5.93 × 10⁶ m/s.

דוגמה 3.3 לוחות של 0.010 m² במרחק 1.0 mm מחוברים ל-12 V. מצאו את C, Q ו-U.

1. C = ε₀A/d = 8.854 × 10⁻¹² × 0.010/0.001 = 88.5 pF.
2. Q = CV = 1.06 nC.
3. U = ½CV² = 6.37 nJ.

תשובה: 88.5 pF, 1.06 nC, 6.37 nJ.

תרגילים

פתרו כל אחד קודם על נייר, ואז בדקו.

1. צרפו 2 µF ו-3 µF בטור ובמקביל.

   טור 1.2 µF; מקביל 5 µF.

2. מלאו את הקבל של 88.5 pF בדיאלקטרי עם κ = 3.4.

.C = 301 pF

3. קבל-על גדול של 3000 F טעון ל-2.7 V (ערכים לדוגמה). כמה אנרגיה הוא מחזיק?

   U = ½CV² ≈ 10.9 kJ, שבריר זעיר מסוללת רכב חשמלי, אך נמסר בתוך שניות.

4. $V = 4x^2$ וולט. מצאו את E ב-x = 2 m.

   E = −dV/dx = −16 V/m (מצביע לכיוון −x).

תפיסות שגויות נפוצות

מיתוס: פוטנציאל ואנרגיה פוטנציאלית הם אותו דבר.

בפועל: U = qV; V הוא ליחידת מטען.

מיתוס: מתח גבוה לבדו הוא מה שהופך מכת חשמל למסוכנת.

בפועל: מה שחשוב הוא הזרם בגוף; המתח דוחף אותו דרך התנגדות הגוף.

מיתוס: היכן ש-V = 0, גם E = 0.

בפועל: באמצע בין +q ל-−q, V = 0 אך E גדול.

כרטיסיות

פוטנציאל חשמלי

V = U/q, בוולט.

פוטנציאל של מטען נקודתי

V = kq/r.

שדה מתוך פוטנציאל

E = −dV/dx.

קיבול

C = Q/V; פאראד.

לוחות מקבילים

$C = \kappa\varepsilon_0 A/d$.

אנרגיית קבל

U = ½CV².

אלקטרון-וולט

$1\ \text{eV} = 1.602 \times 10^{-19}\ \text{J}$.

בוחן לבדיקה עצמית

1. 1 וולט שווה ל...

1 J/C

1 C/J

1 N/C

1 W/A²

1. J/C אנרגיה ליחידת מטען.

2. חציית המרווח בין לוחות הקבל הופכת את C ל...

חצי

כפול

פי ארבעה

ללא שינוי

כפול. $C = \varepsilon_0 A/d$.

3. הכפלת המתח על קבל מכפילה את האנרגיה האגורה פי...

2

4

½

1

4. $U \propto V^2$.

4. קווים שווי פוטנציאל פוגשים קווי שדה בזווית...

0°

45°

90°

כל זווית

°90. אין עבודה לאורך קו שווה פוטנציאל.

לנסות שוב את הבוחן

איך זה עוזר להציל את כדור הארץ

מכוניות חשמליות אוגרות אנרגיה בסוללות, לא בקבלים, כי קבל מחזיק הרבה פחות אנרגיה לקילוגרם. קבל-העל בתרגול מחזיק כ-10.9 kJ, כ-3.04 וואט-שעה. לקבלים יש מקום היכן שהספק חייב לזרום פנימה או החוצה בתוך שניות, כמו החלקת המוצא של אלקטרוניקת הספק ברכבים חשמליים, בממירים סולאריים ובטורבינות רוח.

ב־Saving Planets: פיזיקה I

מקורות: FuelEconomy.gov (DOE/EPA): All-electric vehicles (https://www.fueleconomy.gov/feg/evtech.shtml) · OpenStax UP2, 8.3 Energy stored in a capacitor (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/8-3-energy-stored-in-a-capacitor)

מקורות לימוד חינמיים

- OpenStax UP2, 7.2 Electric potential and potential difference (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/7-2-electric-potential-and-potential-difference): פוטנציאל.
- OpenStax UP2, 7.3 Calculations of electric potential (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/7-3-calculations-of-electric-potential): פוטנציאל של התפלגויות מטען.
- OpenStax UP2, 8.1 Capacitors and capacitance (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/8-1-capacitors-and-capacitance): קבלים.
- OpenStax UP2, 8.4 Capacitor with a dielectric (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/8-4-capacitor-with-a-dielectric): דיאלקטריים.
- PhET: Capacitor Lab: Basics (https://phet.colorado.edu/en/simulations/capacitor-lab-basics): אינטראקטיבי.

צפו בהרצאה

The Electric Potential and Conservation of Energy (https://oyc.yale.edu/physics/phys-201/lecture-5) (באנגלית)

Ramamurti Shankar, PHYS 201 Fundamentals of Physics II, Open Yale Courses. רישיון: CC BY-NC-SA 3.0 US (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/us/) · תנאי שימוש (https://oyc.yale.edu/terms). הקישור מיועד ללימוד חינמי בלבד; Saving Planets אינו קשור לאוניברסיטה זו ואינו נתמך על ידה.

סיימתי את היחידה הזו

זרם, התנגדות ומעגלי זרם ישר

זרם ומהירות סחיפה, התנגדות סגולית וחוק אוהם, הספק, כא"מ והתנגדות פנימית, נגדים בטור ובמקביל, כללי קירכהוף ומעגלי RC.

מטרות הלמידה

בסוף היחידה הזו תוכלו:

- קשרו זרם למהירות סחיפה והתנגדות להתנגדות סגולית.
- השתמשו בחוק אוהם וב-P = IV.
- צמצמו רשתות טור-מקביל והפעילו את כללי קירכהוף.
- נתחו טעינה ופריקה של מעגלי RC.

מושגי מפתח

- זרם I = dQ/dt; בתיל I = nqv_dA, ומהירות הסחיפה זעירה אף שאותות נעים כמעט במהירות האור.
- התנגדות R = ρL/A. חוק אוהם V = IR מתקיים בחומרים אוהמיים.
- הספק P = IV = I²R = V²/R.
- נגדים בטור מתחברים; במקביל מתחברים ההפכיים.
- קירכהוף: סכום הזרמים הנכנסים לצומת הוא אפס; סכום שינויי המתח סביב כל לולאה הוא אפס.
- מעגל RC נטען לפי V = V₀(1 − e^(−t/RC)); קבוע הזמן הוא τ = RC.

משוואות מפתח

$$I = \frac{dQ}{dt} = nqv_dA$$

I=dQ/dt=nqv_dA

זרם ומהירות סחיפה

$$R = \rho\frac{L}{A}, \quad V = IR$$

R=ρL/A, V=IR

התנגדות וחוק אוהם

$$P = IV = I^2R$$

P=IV=I^2R

הספק חשמלי

$$\sum I = 0, \quad \sum \Delta V = 0$$

I=0, Δ V=0

כללי קירכהוף

$$V_C = V_0\left(1 - e^{-t/RC}\right)$$

V_C=V_0(1-e^-t/RC)

טעינת קבל

דוגמאות פתורות שלב אחר שלב

דוגמה 4.1 מצאו את ההתנגדות של 100 m תיל נחושת בקוטר 1.0 mm ($\rho = 1.68 \times 10^{-8}\ \Omega\cdot m$).

1. $A = \pi(0.5 \times 10^{-3})^2 = 7.85 \times 10^{-7}\ m^2$.
2. $R = \rho L/A = 1.68 \times 10^{-8} \times 100/7.85 \times 10^{-7}$.

תשובה: $\approx 2.14\ \Omega$.

דוגמה 4.2 שתי סוללות (12 V ו-6 V) ושלושה נגדים: בלולאה 1 יש $R_1 = 2\ \Omega$, 12 V והנגד המשותף $R_3 = 6\ \Omega$; בלולאה 2 יש 6 V, $R_2 = 3\ \Omega$ ו-R_3. מצאו את הזרמים.

1. צומת: $I_3 = I_1 + I_2$.
2. לולאה 1: $12 = 2I_1 + 6I_3$. לולאה 2: $6 = 3I_2 + 6I_3$.
3. פתרון: $I_1 = 2\ A$, $I_2 = -0.667\ A$, $I_3 = 1.33\ A$.

תשובה: $I_1 = 2\ A$; $I_2 = -0.667\ A$ (סימן המינוס פירושו שסוללת ה-12 V דוחפת זרם אחורה דרך סוללת ה-6 V וטוענת אותה); $I_3 = 1.33\ A$.

דוגמה 4.3 קבל של 100 µF נטען מסוללה של 9 V דרך 10 kΩ. מצאו את τ ואת המתח אחרי 1 s ו-3 s.

1. $\tau = RC = 10^4 \times 10^{-4} = 1.0\ s$.
2. $V(1) = 9(1 - e^{(-1)})$; $V(3) = 9(1 - e^{(-3)})$.

תשובה: 1.0 s; 5.69 V; 8.55 V.

תרגילים

פתרו כל אחד קודם על נייר, ואז בדקו.

1. נורה של 60 W פועלת על 120 V. מצאו את הזרם וההתנגדות שלה.

   $I = 0.5\ \text{A}$; $R = 240\ \Omega$.

2. מצאו את השקול של 6 Ω ו-3 Ω במקביל, ואז את הזרם מ-12 V דרך הזוג הזה בטור עם 4 Ω.

   $2\ \Omega$; $I = 12/6 = 2\ \text{A}$.

3. מצאו את מהירות הסחיפה עבור 1 A בתיל הנחושת של 1.0 mm ($n = 8.5 \times 10^{28}\ \text{m}^{-3}$).

   $v_d = I/(neA) \approx 9.4 \times 10^{-5}\ \text{m/s}$, כשליש מטר לשעה.

4. לפאנל סולארי יש 60 תאים בטור, כל אחד נותן 0.6 V (ערכים לדוגמה). מהו מתח הפאנל? איך תכפילו במקום זאת את הזרם?

   36 V; חברו שני פאנלים במקביל.

תפיסות שגויות נפוצות

מיתוס: זרם "מתכלה" בנגד.

בפועל: המטען נשמר; האנרגיה היא שמומרת, לא הזרם.

מיתוס: אלקטרונים דוהרים בתילים כמעט במהירות האור.

בפועל: האות כן; האלקטרונים נסחפים בשבריר מילימטר לשנייה.

מיתוס: סוללה מספקת זרם קבוע.

בפועל: היא מספקת כא"מ קבוע בערך; הזרם תלוי במעגל.

כרטיסיות

זרם

$I = dQ/dt$; אמפר.

חוק אוהם

$V = IR$.

התנגדות סגולית

$R = \rho L/A$.

הספק

$P = IV = I^2R = V^2/R$.

כלל הצומת

$\Sigma I = 0$.

כלל הלולאה

$\Sigma \Delta V = 0$.

קבוע הזמן RC

τ = RC.

בוחן לבדיקה עצמית

1. הכפלת אורך התיל מכפילה את…

ההתנגדות הסגולית

ההתנגדות

הזרם

שטח החתך

ההתנגדות. R = ρL/A.

2. שני נגדים שווים R במקביל נותנים…

2R

R

R/2

R²

R/2. 1/R + 1/R.

3. אחרי קבוע זמן אחד, קבל נטען נמצא ב…

37%

50%

63%

100%

63%. 1 − e^(−1).

4. כלל הלולאה של קירכהוף נובע משימור…

מטען

אנרגיה

תנע

מסה

אנרגיה. פוטנציאל הוא אנרגיה ליחידת מטען.

לנסות שוב את הבוחן

איך זה עוזר להציל את כדור הארץ

פאנל סולארי הוא מעגל זרם ישר. תאים מחוברים בטור כדי להעלות מתח ופאנלים במקביל כדי להעלות זרם, בדיוק כמו בתרגול. תא דוחף מטען בכיוון אחד בלבד, ולכן המוצא של פאנל הוא זרם ישר; יש להמירו לזרם חילופין לפני שיוכל להצטרף לרשת (יחידה 9). משרד האנרגיה האמריקאי מסביר איך התאים עצמם פועלים.

ב־Saving Planets: תצפית על כדור הארץ

מקורות: OpenStax UP2, 10.3 Kirchhoff's rules (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/10-3-kirchhoffs-rules) · U.S. DOE: How does solar work? (https://www.energy.gov/eere/solar/how-does-solar-work)

מקורות לימוד חינמיים

- OpenStax UP2, 9.1 Electrical current (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/9-1-electrical-current): זרם.
- OpenStax UP2, 9.3 Resistivity and resistance (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/9-3-resistivity-and-resistance): התנגדות.
- OpenStax UP2, 10.2 Resistors in series and parallel (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/10-2-resistors-in-series-and-parallel): צירופים.
- OpenStax UP2, 10.5 RC circuits (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/10-5-rc-circuits): מעגלי RC.
- PhET: Ohm's Law (https://phet.colorado.edu/en/simulations/ohms-law): אינטראקטיבי.

סיימתי את היחידה הזו

שדות וכוחות מגנטיים

הכוח המגנטי על מטענים נעים ועל זרמים, תנועה מעגלית של חלקיקים טעונים, מומנט על לולאת זרם, ואיך מנועים חשמליים פועלים.

מטרות הלמידה

בסוף היחידה הזו תוכלו:

- השתמשו ב-F = qv × B עם כלל יד ימין.
- מצאו את הרדיוס והתדירות של מסלול מעגלי של חלקיק טעון.
- מצאו את הכוח על תיל נושא זרם ואת המומנט על לולאה.
- הסבירו איך מנוע זרם ישר הופך זרם לסיבוב.

מושגי מפתח

- שדה מגנטי דוחף מטען נע: F = qv × B, ניצב גם ל-v וגם ל-B. הוא אינו מבצע עבודה, ולכן משנה כיוון ולא גודל מהירות.
- מטען הנע לרוחב שדה אחיד מסתובב ברדיוס r = mv/(|q|B) ובתדירות ציקלוטרון f = |q|B/(2πm), שאינה תלויה במהירות.
- תיל הנושא זרם I בשדה B חש F = IL × B.
- ללולאת זרם יש מומנט מגנטי μ = NIA והיא חשה מומנט כוח τ = μB sin θ. המומנט הזה הוא שמסובב מנוע חשמלי.
- שדות E ו-B מוצלבים מעבירים רק חלקיקים עם v = E/B (בורר מהירויות).

משוואות מפתח

$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$$

F=q v× B

כוח מגנטי על מטען

$$r = \frac{mv}{|q|B}, \quad f = \frac{|q|B}{2\pi m}$$

r=(mv)/(|q|B), f=(|q|B)/(2π m)

תנועה מעגלית בשדה

$$\vec{F} = I\vec{L} \times \vec{B}$$

F=I L× B

כוח על זרם

$$\tau = NIAB\sin\theta$$

τ=NIABθ

מומנט על לולאה

דוגמאות פתורות שלב אחר שלב

דוגמה 5.1 פרוטון מרוח השמש נע ב-400 km/s בניצב לשדה של 50 μT (ערכים לדוגמה). מצאו את רדיוס המעגל שלו.

1. $r = mv/(eB) = 1.673\times10^{-27}\times4\times10^{5}/(1.602\times10^{-19}\times5\times10^{-5})$.

תשובה: ≈ 83.5 m. חלקיקים טעונים מסתלסלים בצפיפות לאורך קווי השדה במקום לחצות אותם.

דוגמה 5.2 תיל של 0.20 m הנושא 200 A ניצב לשדה של 0.50 T. מצאו את הכוח.

1. $F = ILB = 200\times0.20\times0.50$.

תשובה: 20 N.

דוגמה 5.3 לסליל מנוע יש 100 כריכות בשטח $0.01\ m^2$ הנושאות 2 A בשדה של 0.5 T. מצאו את המומנט המרבי.

1. $\tau = NIAB = 100\times2\times0.01\times0.5$.

תשובה: 1.0 N·m, כשמישור הסליל מקביל לשדה.

תרגילים

פתרו כל אחד קודם על נייר, ואז בדקו.

1. מצאו את תדירות הציקלוטרון של פרוטון בשדה של 1 T.

   $f = eB/(2\pi m_p) \approx 15.2$ MHz.

2. אלקטרון נע ב-1×10^{5} m/s לרוחב שדה של 50 μT. מצאו את r.

   $r = m_e v/(eB) \approx 1.14$ cm.

3. איזו מהירות עוברת ללא סטייה דרך $E = 10^{4}$ V/m ו-$B = 0.1$ T?

   $v = E/B = 10^{5}$ m/s.

4. האם שדה מגנטי סטטי יכול להאיץ מטען?

   לא: $v \perp F$, ולכן הוא אינו מבצע עבודה.

תפיסות שגויות נפוצות

מיתוס: הכוח המגנטי מצביע לאורך השדה.

בפועל: הוא ניצב ל-B ול-v.

מיתוס: מטען במנוחה חש כוח מגנטי.

בפועל: רק מטענים נעים חשים אותו.

מיתוס: מהירות גבוהה יותר פירושה תדירות ציקלוטרון גבוהה יותר.

בפועל: הרדיוס גדל עם המהירות, אך התדירות לא.

כרטיסיות

כוח לורנץ

$F = q(E + v \times B)$.

כלל יד ימין

אצבעות לפי v, קפלו לעבר B, האגודל נותן F עבור q חיובי.

רדיוס ציקלוטרון

$r = mv/(qB)$.

כוח על תיל

$F = ILB \sin\theta$.

מומנט מגנטי

$\mu = NIA$.

מומנט המנוע

$\tau = NIAB \sin\theta$.

בוחן לבדיקה עצמית

1. הכוח המגנטי על מטען הנע במקביל ל-B הוא...

מקסימלי

אפס

qvB

qE

אפס. $\sin 0 = 0$.

2. יחידת ה-SI של שדה מגנטי היא…

גאוס

טסלה

ובר

הנרי

טסלה. $1\ \mathrm{T} = 1\ \mathrm{N/(A\cdot m)}$; $1\ \mathrm{G} = 10^{-4}\ \mathrm{T}$.

3. הכפלת המהירות של חלקיק טעון ב-B אחיד משנה את הרדיוס שלו פי…

½×

1×

2×

4×

$r = mv/(qB)$. ×2.

4. המומנט על סליל מנוע מרבי כשמישורו…

ניצב ל-B

מקביל ל-B

בזווית 30°

כל זווית

מקביל ל-B. אז μ ניצב ל-B.

לנסות שוב את הבוחן

איך זה עוזר להציל את כדור הארץ

מכוניות חשמליות פועלות על מומנט מגנטי: הזרם בסלילי המנוע נמצא בשדה מגנטי, ו-$\tau = NIAB\sin\theta$ מסובב את הגלגלים. לפי FuelEconomy.gov, רכבים חשמליים ממירים יותר מ-77% מהאנרגיה החשמלית מהרשת להספק בגלגלים, בעוד שמכוניות בנזין

ממירות רק כ-12% עד 30% מהאנרגיה שבדלק.

השדה של כדור הארץ, בין כ-25 ל-65 μT על פני השטח לפי NOAA, מכופף חלקיקים טעונים של רוח השמש לספירלות הדוקות, כמו בדוגמה הפתורה הראשונה. חלקיקים שנלכדים כך מונחים לאורך קווי השדה לעבר הקטבים, ושם הם מאירים את הזוהר הקוטבי.

ב־Saving Planets: מזג אוויר בחלל

מקורות: FuelEconomy.gov (DOE/EPA): All-electric vehicles (https://www.fueleconomy.gov/feg/evtech.shtml) · NOAA NCEI: Geomagnetism frequently asked questions (https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/faqgeom.shtml)

מקורות לימוד חינמיים

- OpenStax UP2, 11.3 Motion of a charged particle in a magnetic field (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/11-3-motion-of-a-charged-particle-in-a-magnetic-field): תנועה מעגלית.
- OpenStax UP2, 11.4 Magnetic force on a current-carrying conductor (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/11-4-magnetic-force-on-a-current-carrying-conductor): כוח על תילים.
- OpenStax UP2, 11.5 Force and torque on a current loop (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/11-5-force-and-torque-on-a-current-loop): מנועים.
- PhET: Magnets and Electromagnets (https://phet.colorado.edu/en/simulations/magnets-and-electromagnets): אינטראקטיבי.

סיימתי את היחידה הזו

מקורות של שדות מגנטיים: ביו–סבאר ואמפר

איך זרמים יוצרים שדות מגנטיים: חוק ביו–סבאר, שדות של תילים, לולאות וסולנואידים, כוחות בין זרמים מקבילים, וחוק אמפר.

מטרות הלמידה

בסוף היחידה הזו תוכלו:

- השתמשו בחוק ביו–סבאר עבור תיל ולולאה.
- הפעילו את חוק אמפר על תילים וסולנואידים.
- מצאו את הכוח בין זרמים מקבילים.
- השוו שדות מעשה ידי אדם לשדה של כדור הארץ.

מושגי מפתח

- ביו–סבאר: כל קטע זרם I dl יוצר $dB = (\mu_0/4\pi)\, I\, dl \times \hat{r}/r^2$. קווי השדה מקיפים את הזרם (כלל יד ימין: האגודל לאורך I, האצבעות מתקפלות עם B).
- תיל ישר ארוך: $B = \mu_0 I/(2\pi r)$. במרכז לולאה ברדיוס R: $B = \mu_0 I/(2R)$.
- חוק אמפר: $\oint B \cdot dl = \mu_0 I_{enc}$. כמו חוק גאוס, הוא הכי קל עם סימטריה.
- בתוך סולנואיד ארוך $B = \mu_0 n I$, אחיד, כאשר n הוא מספר הכריכות למטר.
- זרמים מקבילים נמשכים; זרמים מנוגדים נדחים, בכוח ליחידת אורך $\mu_0 I_1 I_2/(2\pi d)$.

משוואות מפתח

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{I\, d\vec{l} \times \hat{r}}{r^2}$$

```
d B=(μ_0)/(4π)(I d l× r)/(r^2)
```

חוק ביו–סבאר

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$$

```
B=(μ_0I)/(2π r)
```

תיל ישר ארוך

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I_{\text{enc}}$$

```
B· d l=μ_0I_enc
```

חוק אמפר

$$B = \mu_0 n I$$

B=μ_0nI

סולנואיד ארוך

$$\frac{F}{L} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi d}$$

FL=(μ_0I_1I_2)/(2π d)

תילים מקבילים

דוגמאות פתורות שלב אחר שלב

דוגמה 6.1 קו הולכה נושא 1000 A (ערך דוגמה). מצאו את B במרחק 20 m והשוו לשדה של כדור הארץ.

1. $B = \mu_0 I/(2\pi r) = 4\pi \times 10^{-7} \times 1{,}000/(2\pi \times 20)$.

תשובה: 10 μT, קטן מהשדה של כדור הארץ על פני השטח, 25–65 μT.

דוגמה 6.2 לסולנואיד יש 1000 כריכות למטר והוא נושא 2 A. מצאו את B בתוכו.

1. $B = \mu_0 n I = 4\pi \times 10^{-7} \times 1{,}000 \times 2$.

תשובה: 2.51 mT ≈, כפי 50 מהשדה של כדור הארץ.

דוגמה 6.3 שני תילים מקבילים במרחק 1 cm נושאים כל אחד 10 A באותו כיוון. מצאו את הכוח למטר.

1. $F/L = \mu_0 I_1 I_2/(2\pi d) = 4\pi \times 10^{-7} \times 100/(2\pi \times 0.01)$.

תשובה: 2.0 mN/m, משיכה.

תרגילים

פתרו כל אחד קודם על נייר, ואז בדקו.

1. מצאו את B במרכז לולאה ברדיוס 5 cm הנושאת 5 A.

   $B = \mu_0 I/(2R) \approx 62.8$ μT.

2. תיל נושא 2 A. מצאו את B ב-1, 2 ו-4 cm.

40, 20 ו-μT 10: נחצה בכל הכפלה של המרחק.

3. השתמשו בחוק אמפר כדי למצוא את B בתוך תיל עבה ברדיוס a ב-r < a (זרם אחיד).

B(2πr) = μ₀I r²/a², ולכן B = μ₀Ir/(2πa²), גדל לינארית מהמרכז.

4. מהו B מחוץ לטורואיד אידיאלי?

אפס: הלולאה אינה כולאת זרם נטו.

תפיסות שגויות נפוצות

מיתוס: קווי שדה מגנטי מתחילים ומסתיימים בקטבים.

בפועל: הם יוצרים לולאות סגורות; אין מונופולים.

מיתוס: חוק אמפר נותן את B לכל זרם.

בפועל: הוא תמיד מתקיים, אך נותן את B ישירות רק עם סימטריה.

מיתוס: השדה של תיל מצביע לאורך התיל.

בפועל: הוא מקיף את התיל.

כרטיסיות

ביו–סבאר

dB = (μ₀/4π) I dl × r/r².

שדה של תיל

B = μ₀I/(2πr).

מרכז לולאה

B = μ₀I/(2R).

חוק אמפר

∮B·dl = μ₀I_enc.

סולנואיד

B = μ₀nI.

זרמים מקבילים

אותו כיוון נמשכים.

בוחן לבדיקה עצמית

1. B של תיל ארוך יורד עם המרחק כמו…

1/r²

1/r

קבוע

r

$1/r$. $\mu_0 I/(2\pi r)$.

2. בתוך סולנואיד ארוך, B תלוי ב…

רדיוס

כריכות למטר וזרם

אורך בלבד

מרחק מהציר

כריכות למטר וזרם. $B = \mu_0 n I$.

3. שני תילים עם זרמים בכיוונים מנוגדים…

נמשכים

נדחים

אינם חשים כוח

מתפתלים

נדחים. זרמים מנוגדים נדחים.

4. μ_0 הוא בערך…

8.85×10^{-12}

1.26×10^{-6}

9×10^{9}

3×10^{8}

1.26×10^{-6}. $4\pi \times 10^{-7}$ T·m/A.

לנסות שוב את הבוחן

איך זה עוזר להציל את כדור הארץ

השדה של כדור הארץ עצמו נוצר על ידי זרמים: NOAA מסבירה שיותר מ-90% ממנו נוצר בליבה החיצונית על ידי מה ש-NOAA מכנה הדינמו הפנימי של כדור הארץ: חומר מוליך חשמל בתנועה הנושא זרם. חוק ביו–סבאר הוא הגשר בין הזרמים האלה לבין השדה שמצפן קורא. ה-World Magnetic Model של NOAA מתאר את השדה הראשי הזה.

ב־Saving Planets: מזג אוויר בחלל

מקורות: OpenStax · NOAA NCEI: Geomagnetism frequently asked questions (https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/faqgeom.shtml) · UP2, 12.1 The Biot–Savart law (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/12-1-the-biot-savart-law)

מקורות לימוד חינמיים

- OpenStax UP2, 12.1 The Biot–Savart law (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/12-1-the-biot-savart-law): ביו–סבאר.
- OpenStax UP2, 12.5 Ampère’s law (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/12-5-amperes-law): חוק אמפר.
- PhET: Magnet and Compass (https://phet.colorado.edu/en/simulations/magnet-and-compass): אינטראקטיבי.
- MIT OpenCourseWare 8.02 Physics II: Electricity and Magnetism (https://ocw.mit.edu/courses/8-02-physics-ii-electricity-and-magnetism-spring-2019/): הרצאות ומטלות.

סיימתי את היחידה הזו

השראה אלקטרומגנטית: פאראדיי ולנץ

שטף מגנטי, חוק פאראדיי, חוק לנץ, כא"מ תנועתי, שדות חשמליים מושרים, זרמי מערבולת, והגנרטורים שמאחורי אנרגיית רוח ומים.

מטרות הלמידה

בסוף היחידה הזו תוכלו:

- חשבו שטף מגנטי ואת הכא"מ משטף משתנה.
- השתמשו בחוק לנץ כדי למצוא את כיוון הזרם המושרה.
- מצאו כא"מ תנועתי של מוט נע.
- חשבו את המוצא של גנרטור חילופין ואת ההספק של תחנה הידרואלקטרית.

מושגי מפתח

- שטף מגנטי Φ_B = ∫B·dA, בוובר.
- חוק פאראדיי: שטף משתנה דרך סליל של N כריכות משרה כא"מ ε = −N dΦ_B/dt.
- חוק לנץ (סימן המינוס): הזרם המושרה מתנגד לשינוי בשטף שגרם לו, וזהו שימור אנרגיה.
- מוט באורך L הנע במהירות v לרוחב B יוצר כא"מ תנועתי ε = BLv.
- סליל המסתובב במהירות זוויתית ω ב-B נותן ε = NBAω sin ωt: זרם חילופין. סיבובו דורש עבודה מכנית, וכך גנרטורים ממירים תנועה לאנרגיה חשמלית.

משוואות מפתח

$$\Phi_B = \int \vec{B} \cdot d\vec{A}$$

_B= B· d A

שטף מגנטי

$$\varepsilon = -N\frac{d\Phi_B}{dt}$$

=-N(d_B)/(dt)

חוק פאראדיי

$$\varepsilon = BLv$$

=BLv

כא"מ תנועתי

$$\varepsilon(t) = NBA\omega \sin \omega t$$

(t)=NBAωω t

גנרטור חילופין

$$P = \eta \rho g Q h$$

P=ρ gQh

אנרגיה הידרואלקטרית

דוגמאות פתורות שלב אחר שלב

דוגמה 7.1 לסליל גנרטור יש 100 כריכות בשטח 0.04 m² המסתובבות ב-60 סיבובים/s בשדה של 0.5 T. מצאו את כא"מ השיא.

1. ω = 2π × 60 = 377 rad/s.
2. ε_max = NBAω = 100 × 0.5 × 0.04 × 377.

תשובה: ≈ 754 V.

דוגמה 7.2 סליל של 200 כריכות בשטח 0.01 m² רואה את B עולה מ-0 ל-0.3 T תוך 0.5 s. מצאו את הכא"מ הממוצע.

1. ΔΦ = BA = 0.003 Wb לכריכה.
2. ε = NΔΦ/Δt = 200 × 0.003/0.5.

תשובה: 1.2 V.

דוגמה 7.3 תחנה הידרואלקטרית מעבירה 100 m³/s דרך מפל של 50 m בנצילות של 90% (ערכים לדוגמה). מצאו את ההספק שלה.

1. P = ηρgQh = 0.9 × 1,000 × 9.81 × 100 × 50.

תשובה: ≈ 44.1 MW.

תרגילים

פתרו כל אחד קודם על נייר, ואז בדקו.

1. מוט של 0.2 m נע ב-3 m/s לרוחב שדה של 0.5 T. מצאו את הכא"מ.

   BLv = 0.3 V.

2. הקוטב הצפוני של מגנט מתקרב ללולאה. לאיזה כיוון זורם הזרם המושרה, במבט מהמגנט?

נגד כיוון השעון, ויוצר פן צפוני הדוחה את המגנט המתקרב.

3. מדוע קשה יותר לסובב גנרטור כשמדליקים נורות?

הזרם בסליל חש מומנט מגנטי המתנגד לתנועה (לנץ); משם מגיעה האנרגיה החשמלית.

4. הכפלת קצב הסיבוב של גנרטור משנה את כא"מ השיא שלו פי…?

.×2: ε_max = NBAω

תפיסות שגויות נפוצות

מיתוס: שדה חזק אך קבוע משרה זרם.

בפועל: רק שטף משתנה משרה כא"מ.

מיתוס: חוק לנץ מתנגד לשדה.

בפועל: הוא מתנגד לשינוי בשטף.

מיתוס: גנרטורים יוצרים אנרגיה.

בפועל: הם ממירים עבודה מכנית לאנרגיה חשמלית.

כרטיסיות

שטף מגנטי

.Φ = BA cos θ; וובר

חוק פאראדיי

.ε = −N dΦ/dt

חוק לנץ

הזרם המושרה מתנגד לשינוי.

כא"מ תנועתי

.ε = BLv

גנרטור

.ε = NBAω sin ωt

זרמי מערבולת

לולאות מושרות במתכת מלאה; משמשות לבלימה.

בוחן לבדיקה עצמית

1. חוק פאראדיי קושר את הכא"מ ל…

שטף

קצב השינוי של השטף

הזרם

ההתנגדות

קצב השינוי של השטף. ε = −N dΦ/dt.

2. סימן המינוס בחוק פאראדיי הוא...

חוק אוהם

חוק לנץ

חוק גאוס

מוסכמה בלבד

חוק לנץ. מתנגד לשינוי.

3. סליל המסתובב בשדה קבוע מייצר...

DC

AC

אין כא"מ

מטען סטטי

AC. ε ∝ sin ωt.

4. יחידת ה-SI של שטף מגנטי היא...

טסלה

ובר

הנרי

פאראד

ובר. 1 Wb = 1 T·m².

לנסות שוב את הבוחן

איך זה עוזר להציל את כדור הארץ

אנרגיית רוח ומים הן חוק פאראדיי. משרד האנרגיה האמריקאי מסביר שהרוח מסובבת את להבי הטורבינה סביב רוטור, שמסובב גנרטור שמייצר חשמל, ושתחנות הידרואלקטריות משתמשות בטורבינות ובגנרטורים כדי להמיר את האנרגיה הקינטית של מים זורמים לחשמל לרשת.

ב־Saving Planets: פיזיקה I

מקורות: משרד האנרגיה האמריקאי: איך פועלות טורבינות רוח? (באנגלית) (https://www.energy.gov/eere/wind/how-do-wind-turbines-work) · U.S. DOE: How hydropower works (https://www.energy.gov/eere/water/how-hydropower-works)

מקורות לימוד חינמיים

- OpenStax UP2, 13.1 Faraday's law (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/13-1-faradays-law): פאראדיי.
- OpenStax UP2, 13.2 Lenz's law (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/13-2-lenzs-law): לנץ.
- OpenStax UP2, 13.3 Motional EMF (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/13-3-motional-emf): מוליכים נעים.
- OpenStax UP2, 13.6 Electric generators and back EMF (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/13-6-electric-generators-and-back-emf): גנרטורים.
- PhET: Faraday's Law (https://phet.colorado.edu/en/simulations/faradays-law): אינטראקטיבי.

צפו בהרצאה

Lenz's and Faraday's Laws (https://oyc.yale.edu/physics/phys-201/lecture-11) (באנגלית)

Ramamurti Shankar, PHYS 201 Fundamentals of Physics II, Open Yale Courses. רישיון: CC BY-NC-SA 3.0 US (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/us/) · תנאי שימוש (https://oyc.yale.edu/terms). הקישור מיועד ללימוד חינמי בלבד; Saving Planets אינו קשור לאוניברסיטה זו ואינו נתמך על ידה.

סיימתי את היחידה הזו

השראות, מעגלי RL ו-LC

השראות הדדית והשראות עצמית, אנרגיה אגורה בשדות מגנטיים, מעגלי RL וקבוע הזמן שלהם, ותנודות LC.

מטרות הלמידה

בסוף היחידה הזו תוכלו:

- מצאו את ההשראות העצמית של סולנואיד ואת הכא"מ של משרן.
- נתחו גדילה ודעיכה של זרם במעגלי RL.
- חשבו אנרגיה במשרן וצפיפות אנרגיה מגנטית.
- מצאו את התדירות של מתנד LC.

מושגי מפתח

- זרם משתנה בסליל אחד משרה כא"מ בסליל אחר: $\varepsilon_2 = -M\, dI_1/dt$ (השראות הדדית).
- סליל מתנגד לשינויים בזרם שלו עצמו: $\varepsilon = -L\, dI/dt$. לסולנואיד ארוך יש $L = \mu_0 N^2 A/l$.
- במעגל RL הזרם עולה לפי $I = (\varepsilon/R)(1 - e^{-t/\tau})$ עם $\tau = L/R$.
- משרן אוגר $U = \tfrac{1}{2}LI^2$; כל שדה מגנטי אוגר צפיפות אנרגיה $u = B^2/(2\mu_0)$.
- מעגל LC מחליף אנרגיה בין הקבל למשרן ב-$\omega = 1/\sqrt{LC}$, התאום החשמלי של מסה על קפיץ.

משוואות מפתח

$$\varepsilon = -L\frac{dI}{dt}, \quad L = \frac{\mu_0 N^2 A}{l}$$

=-LdI/dt, L=(μ_0N^2A)/(l)

השראות עצמית

$$I = \frac{\varepsilon}{R}\left(1 - e^{-t/\tau}\right), \; \tau = \frac{L}{R}$$

I=()/(R)(1-e^-t/τ),\ τ= LR

מעגל RL

$$U = \tfrac{1}{2}LI^2, \quad u_B = \frac{B^2}{2\mu_0}$$

U=12LI^2, u_B=(B^2)/(2μ_0)

אנרגיה מגנטית

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

דוגמאות פתורות שלב אחר שלב

דוגמה 8.1 לסולנואיד 500 כריכות, חתך $1.0 \times 10^{-3}\ \text{m}^2$ ואורך $0.25\ \text{m}$. מצאו את L, ואז את τ עם נגד של $10\ \Omega$.

1. $L = \mu_0 N^2 A / l = 4\pi \times 10^{-7} \times 250{,}000 \times 10^{-3} / 0.25 = 1.26\ \text{mH}$.
2. $\tau = L/R = 0.126\ \text{ms}$.

תשובה: $1.26\ \text{mH}$; $0.126\ \text{ms}$.

דוגמה 8.2 כמה אנרגיה אוגר המשרן הזה ב-$2\ \text{A}$?

1. $U = \tfrac{1}{2} L I^2 = \tfrac{1}{2} \times 1.257 \times 10^{-3} \times 4$.

תשובה: $\approx 2.51\ \text{mJ}$.

דוגמה 8.3 מצאו את תדירות התנודה של משרן $10\ \text{mH}$ עם קבל $1\ \mu\text{F}$.

1. $f = 1/(2\pi\sqrt{(LC)}) = 1/(2\pi\sqrt{(10^{-8})})$.

תשובה: $\approx 1.59\ \text{kHz}$.

תרגילים

פתרו כל אחד קודם על נייר, ואז בדקו.

1. לשני סלילים $M = 0.01\ \text{H}$. הזרם באחד משתנה בקצב $100\ \text{A/s}$. מצאו את הכא"מ בשני.

   $1\ \text{V}$.

2. איזה חלק מהזרם הסופי מגיע מעגל RL אחרי 1τ ו-3τ?

   63% ו-95%.

3. מצאו את צפיפות האנרגיה המגנטית של שדה כדור הארץ, $50\ \mu\text{T}$.

   $B^2/(2\mu_0) \approx 9.9 \times 10^{-4}\ \text{J/m}^3$.

4. מדוע כיבוי עומס השראתי יכול ליצור ניצוץ?

   עצירה מהירה של I הופכת את $L\,dI/dt$ לעצום.

תפיסות שגויות נפוצות

מיתוס: משרן מתנגד לזרם.

בפועל: הוא מתנגד לשינויים בזרם; בזרם ישר יציב הוא סתם תיל.

מיתוס: משרנים אוגרים אנרגיה במטען.

בפועל: בשדה המגנטי.

מיתוס: תנודות LC נמשכות לנצח.

בפועל: התנגדות אמיתית מרסנת אותן (מעגל RLC, יחידה 9).

כרטיסיות

השראות עצמית

$\varepsilon = -L\, dI/dt$.

השראות הדדית

$\varepsilon_2 = -M\, dI_1/dt$.

השראות של סולנואיד

$L = \mu_0 N^2 A/l$.

קבוע הזמן RL

$\tau = L/R$.

אנרגיית משרן

$U = \tfrac{1}{2} L I^2$.

תדירות LC

$\omega = 1/\sqrt{(LC)}$.

בוחן לבדיקה עצמית

1. יחידת ה-SI של השראות היא…

פאראד

הנרי

טסלה

אוהם

הנרי. $1\ H = 1\ V{\cdot}s/A$.

2. הכפלת הכריכות של סולנואיד מכפילה את L פי…

2

4

½

1

4. $L \propto N^2$.

3. קבוע הזמן RL הוא…

RL

L/R

R/L

√(LC)

L/R. $\tau = L/R$.

4. מעגל LC הוא האנלוג החשמלי של…

חיכוך

מסה על קפיץ

גוף נופל

מנוף

מסה על קפיץ. האנרגיה עוברת הלוך ושוב.

לנסות שוב את הבוחן

איך זה עוזר להציל את כדור הארץ

מזג אוויר בחלל הוא השראה בקנה מידה פלנטרי. ה-Space Weather Prediction Center של NOAA מסביר שסופות גיאומגנטיות יוצרות זרמים מושרים גיאומגנטית מזיקים ברשת החשמל ובצנרות, וגם זוהר קוטבי יפהפה. הסופות מונעות על ידי

פליטות מסה עטרתיות, ש-NOAA אומרת שהן עוזבות את השמש במהירויות מפחות מ-250 km/s ועד כמעט 3000 km/s; המהירות ביותר שמכוונות לכדור הארץ מגיעות תוך 15 עד 18 שעות בלבד.

ב־Saving Planets: מזג אוויר בחלל · Solar Orbiter

מקורות: · NOAA Space Weather Prediction Center: Geomagnetic storms (https://www.swpc.noaa.gov/phenomena/geomagnetic-storms) NOAA Space Weather Prediction Center: Coronal mass ejections (https://www.swpc.noaa.gov/phenomena/coronal-mass-ejections)

מקורות לימוד חינמיים

- OpenStax UP2, 14.1 Mutual inductance (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/14-1-mutual-inductance): השראות הדדית.
- OpenStax UP2, 14.2 Self-inductance and inductors (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/14-2-self-inducta nce-and-inductors): משרנים.
- OpenStax UP2, 14.4 RL circuits (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/14-4-rl-circuits): מעגלי RL.
- OpenStax UP2, 14.5 Oscillations in an LC circuit (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/14-5-oscillations-in-a n-lc-circuit): מעגלי LC.

סיימתי את היחידה הזו

מעגלי זרם חילופין, שנאים ורשת החשמל

זרם חילופין, ערכי RMS, היגב ועכבה, פאזורים, תהודת RLC, מקדם הספק, שנאים, ומדוע הרשת מולכת במתח גבוה.

מטרות הלמידה

בסוף היחידה הזו תוכלו:

- המירו בין ערכי שיא לערכי RMS.
- מצאו היגב, עכבה, פאזה וזרם במעגל RLC טורי.
- חשבו הספק ממוצע ומקדם הספק.
- השתמשו ביחסי שנאים והסבירו הולכה במתח גבוה.

מושגי מפתח

- זרם החילופין הביתי סינוסי; מכשירי מדידה קוראים ערכי RMS, עם V_rms = V₀/√2.
- למשרנים היגב X_L = ωL ולקבלים X_C = 1/(ωC). במעגל RLC טורי Z = √(R² + (X_L − X_C)²).
- הזרם מקדים או מפגר אחרי המתח ב-φ כאשר tan φ = (X_L − X_C)/R. ההספק הממוצע הוא P = I_rms V_rms cos φ; cos φ הוא מקדם ההספק.
- בתהודה ω₀ = 1/√(LC), X_L = X_C והזרם מרבי.
- שנאי אידיאלי שומר על הספק: V₂/V₁ = N₂/N₁ ו-I₂/I₁ = N₁/N₂. הוא פועל רק עם זרם חילופין, בהשראה הדדית.
- הפסד הקו הוא I²R. שליחת אותו הספק במתח גבוה פי 10 מקטינה את הזרם פי 10 ואת ההפסדים פי 100.

משוואות מפתח

$$V_{\text{rms}} = \frac{V_0}{\sqrt{2}}$$

V_rms=(V_0)/(2)

ערך RMS

$$X_L = \omega L, \quad X_C = \frac{1}{\omega C}$$

X_L=ω L, X_C=1ω C

היגב

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}, \; \tan\varphi = \frac{X_L - X_C}{R}$$

Z=^2+(X_L-X_C)^2,\ =(X_L-X_C)/(R)

עכבה ופאזה

$$P = I_{\text{rms}} V_{\text{rms}} \cos\varphi$$

`P=I_rmsV_rms`

הספק ממוצע

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{N_2}{N_1}$$

`(V_2)/(V_1)=(N_2)/(N_1)`

שנאי

$$P_{\text{loss}} = I^2 R = \left(\frac{P}{V}\right)^2 R$$

`P_loss=I^2R=(P/V)^2R`

הפסד קו

דוגמאות פתורות שלב אחר שלב

דוגמה 9.1 במעגל טורי $R = 20\ \Omega$, $L = 0.1\ \text{H}$ ו-$C = 100\ \mu\text{F}$ על $120\ \text{V RMS}$ ב-$60\ \text{Hz}$. מצאו את העכבה, הזרם, הפאזה וההספק.

1. $X_L = 2\pi \times 60 \times 0.1 = 37.7\ \Omega$; $X_C = 1/(2\pi \times 60 \times 10^{-4}) = 26.5\ \Omega$.
2. $Z = \sqrt{(20^2 + 11.2^2)} = 22.9\ \Omega$; $I = 120/22.9 = 5.24\ \text{A}$.
3. $\tan\varphi = 11.2/20$, $\varphi = 29.2°$; $P = I^2R = 549\ \text{W}$.

תשובה: $22.9\ \Omega$, $5.24\ \text{A}$, הזרם מפגר ב-$29.2°$ (מקדם הספק 0.873), $549\ \text{W}$.

דוגמה 9.2 שלחו $100\ \text{MW}$ בקו עם התנגדות $10\ \Omega$ ב-$345\ \text{kV}$ וב-$34.5\ \text{kV}$. השוו את ההפסדים.

1. $345\ \text{kV}$: $I = 290\ \text{A}$, הפסד $I^2R = 0.84\ \text{MW}$ (0.84%).
2. $34.5\ \text{kV}$: $I = 2899\ \text{A}$, הפסד $= 84\ \text{MW}$.

תשובה: $0.84\ \text{MW}$ לעומת $84\ \text{MW}$. פי עשרה מתח נותן מאית מההפסד, ולכן קווים ארוכים פועלים במאות קילו-וולט.

דוגמה 9.3 שנאי עמוד מוריד $7200\ \text{V}$ ל-$240\ \text{V}$ (ערכים לדוגמה). מצאו את יחס הכריכות ואת הזרם הראשוני כשהמשני מספק $30\ \text{A}$.

1. $N_1/N_2 = 7{,}200/240 = 30$.
2. $I_1 = I_2/30$.

תשובה: 30:1; 1.0 A.

תרגילים

פתרו כל אחד קודם על נייר, ואז בדקו.

1. מצאו את מתח השיא של 120 V RMS.

   169.7 V.

2. מצאו את תדירות התהודה של מעגל ה-RLC שלמעלה.

   $f_0 = 1/(2\pi\sqrt{(LC)}) \approx 50.3$ Hz.

3. מדוע שנאי אינו יכול להעלות מתח ישר?

   זרם קבוע יוצר שטף קבוע, שאינו משרה כא"מ.

4. מה קורה ל-X_C כשהתדירות עולה?

   הוא יורד: קבלים מעבירים תדרים גבוהים.

תפיסות שגויות נפוצות

מיתוס: RMS הוא המתח הממוצע.

בפועל: הממוצע של גל סינוס הוא אפס; RMS הוא שורש ממוצע הריבוע.

מיתוס: שנאי יוצר הספק.

בפועל: הוא מחליף מתח בזרם; הספק יוצא ≤ הספק נכנס.

מיתוס: עכבות מתחברות כמו התנגדויות.

בפועל: הן מתחברות כווקטורים (פאזורים), לא כמספרים פשוטים.

כרטיסיות

RMS

$V_{rms} = V_0/\sqrt{2}$.

היגב השראתי

$X_L = \omega L$.

היגב קיבולי

$X_C = 1/(\omega C)$.

עכבה

$Z = \sqrt{(R^2 + (X_L - X_C)^2)}$.

מקדם הספק

$\cos \varphi = R/Z$.

שנאי

$V_2/V_1 = N_2/N_1$.

הפסד קו

$I^2R = (P/V)^2R$.

בוחן לבדיקה עצמית

1. בתהודה במעגל RLC טורי...

$X_L = X_C$

$Z = 0$

$I = 0$

$R = 0$

$X_L = X_C$. ההיגבים מתבטלים, $Z = R$.

2. העלאת מתח ההולכה פי 10 משנה את הפסד הקו פי...

×10

×1/10

×1/100

×100

×1/100. הפסד $\propto I^2 \propto 1/V^2$.

3. לשנאי מעלה יש...

$N_2 > N_1$

$N_2 < N_1$

$N_2 = N_1$

אין משני

$N_2 > N_1$. $V_2/V_1 = N_2/N_1$.

4. מקדם הספק 1 פירושו...

זרם ומתח באותה פאזה

אין זרם

משרן טהור

קבל טהור

זרם ומתח באותה פאזה. $\cos 0 = 1$.

לנסות שוב את הבוחן

איך זה עוזר להציל את כדור הארץ

ה-Energy Information Administration האמריקאי מעריך שהפסדי ההולכה וההפצה היו בממוצע כ-5% מהחשמל שנשלח ברשת האמריקאית בשנים 2018 עד 2022. ה-EIA מתאר את הרשת כאלפי מיילים של קווי מתח גבוה ומיליוני מיילים של קווי מתח נמוך. מתח גבוה למרחקים, ואז שנאים שמורידים לרמות בטוחות ליד הצרכנים: זו הדוגמה הפתורה שלמעלה בקנה מידה לאומי. כל אחוז שנחסך פירושו פחות דלק שנשרף או יותר אנרגיה נקייה שמסופקת.

ב־Saving Planets: פיזיקה I

מקורות: · U.S. EIA: How much electricity is lost in transmission and distribution? (https://www.eia.gov/tools/faqs/faq.php?id=105&t=3) · U.S. EIA: Delivery to consumers (the power grid) (https://www.eia.gov/energyexplained/electricity/delivery-to-consumers.php)

מקורות לימוד חינמיים

- OpenStax UP2, 15.2 Simple AC circuits (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/15-2-simple-ac-circuits): יסודות זרם חילופין.
- OpenStax UP2, 15.3 RLC series circuits with AC (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/15-3-rlc-series-circuit-s-with-ac): עכבה.
- OpenStax UP2, 15.4 Power in an AC circuit (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/15-4-power-in-an-ac-circui-t): מקדם הספק.
- OpenStax UP2, 15.6 Transformers (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/15-6-transformers): שנאים.
- PhET: Circuit Construction Kit: AC (https://phet.colorado.edu/en/simulations/circuit-construction-kit-ac): אינטראקטיבי.

סיימתי את היחידה הזו

משוואות מקסוול, גלים אלקטרומגנטיים ואופטיקה

זרם ההעתקה וארבע משוואות מקסוול, אור כגל אלקטרומגנטי, אנרגיה ותנע של אור, הספקטרום, ומבוא לאופטיקה: החזרה, שבירה, החזרה פנימית מלאה, קיטוב ועדשות דקות.

מטרות הלמידה

בסוף היחידה הזו תוכלו:

- נסחו את משוואות מקסוול ואת תפקיד זרם ההעתקה.
- גזרו את $c = 1/\sqrt{(\mu_0\varepsilon_0)}$ וקשרו בין f, λ ואנרגיית הפוטון.
- חשבו עוצמה, משרעות שדות ולחץ קרינה.
- השתמשו בחוק סנל, בזווית הקריטית, בחוק מאלוס ובמשוואת העדשה הדקה.

מושגי מפתח

- מקסוול הוסיף את זרם ההעתקה $\varepsilon_0\, d\Phi_E/dt$ לחוק אמפר. איתו, ארבע המשוואות (גאוס עבור E ו-B, פאראדיי, אמפר–מקסוול) חוזות גלים.
- הגלים נעים במהירות $c = 1/\sqrt{(\mu_0\varepsilon_0)} = 3.00 \times 10^8$ m/s, עם $\mathbf{E} \perp \mathbf{B}$ כיוון ההתקדמות ו-$E = cB$. אור הוא אחד מהגלים האלה.
- גלים נושאים אנרגיה, בעוצמה $I = \tfrac{1}{2} c\varepsilon_0 E_0^2$, ותנע, בלחץ I/c על בולע.
- הספקטרום משתרע מרדיו דרך מיקרוגל, אינפרה-אדום, נראה, אולטרה-סגול וקרני X ועד גמא; $c = f\lambda$ ואנרגיית הפוטון $E = hf$.
- בגבול בין תווכים, אור מוחזר בזוויות שוות ונשבר לפי חוק סנל $n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2$. ביציאה מתווך צפוף יותר, מעבר לזווית הקריטית כל האור מוחזר.
- מקטב מעביר $I = I_0 \cos^2\theta$ (מאלוס). עדשה דקה מקיימת $1/f = 1/d_o + 1/d_i$.

משוואות מפתח

$$\oint \vec{E}\cdot d\vec{A} = \frac{Q}{\varepsilon_0},\ \oint \vec{B}\cdot d\vec{A} = 0$$

```
E\cdot d A=(Q)/(_0),\ B\cdot d A=0
```

חוקי גאוס

$$\oint \vec{E}\cdot d\vec{l} = -\frac{d\Phi_B}{dt},\ \oint \vec{B}\cdot d\vec{l} = \mu_0 I + \mu_0\varepsilon_0\frac{d\Phi_E}{dt}$$

```
E\cdot d l=-(d_B)/(dt),\ B\cdot d l=μ_0I+μ_0_0(d_E)/(dt)
```

פאראדיי ואמפר–מקסוול

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0\varepsilon_0}} = f\lambda, \quad E = cB$$

```
c=1μ_0_0=f, E=cB
```

$$I = \tfrac{1}{2} c \varepsilon_0 E_0^2, \quad p = \frac{I}{c}$$

I=12c_0E_0^2, p= Ic

עוצמה ולחץ קרינה

$$n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2$$

n_1θ_1=n_2θ_2

חוק סנל

$$I = I_0 \cos^2\theta, \quad \frac{1}{f} = \frac{1}{d_o} + \frac{1}{d_i}$$

I=I_0^2θ, 1f=1d_o+1d_i

מאלוס ועדשה דקה

דוגמאות פתורות שלב אחר שלב

דוגמה 10.1 חשבו את c מתוך μ_0 ו-ε_0.

1. $c = 1/\sqrt{(4\pi \times 10^{-7} \times 8.854 \times 10^{-12})}$.

תשובה: 2.998×10^8 m/s, מהירות האור הנמדדת, מה שגילה למקסוול שאור הוא אלקטרומגנטי.

דוגמה 10.2 פס האינפרה-אדום הקרוב של Landsat 9 משתרע על 0.85–0.88 µm והפס האדום על (NASA) 0.64–0.67 µm. מצאו את התדירות במרכז כל פס (0.865 ו-0.655 µm) ואת אנרגיית הפוטון באדום.

1. $f = c/\lambda$: 3.47×10^{14} Hz ו-4.58×10^{14} Hz.
2. $E = hc/\lambda = 3.03 \times 10^{-19}$ J = 1.89 eV.

תשובה: אינפרה-אדום קרוב 3.47×10^{14} Hz; אדום 4.58×10^{14} Hz; 1.89 eV.

דוגמה 10.3 אור שמש בהיר של 1000 W/m² (ערך דוגמה) פוגע בפאנל. מצאו את E_0, B_0 ואת הלחץ על משטח בולע.

1. $E_0 = \sqrt{(2I/(c\varepsilon_0))} = 868$ V/m.
2. $B_0 = E_0/c = 2.90$ µT.
3. $p = I/c = 3.34$ µPa.

תשובה: 868 V/m, 2.90 μT, 3.34 μPa.

דוגמה 10.4 אור נכנס למים ($n = 1.33$) בזווית $30°$ מהאנך. מצאו את זווית השבירה ואת הזווית הקריטית לאור היוצא מהמים.

1. $\sin\theta_2 = \sin 30°/1.33$, $\theta_2 = 22.1°$.
2. $\sin\theta_c = 1/1.33$, $\theta_c = 48.8°$.

תשובה: $22.1°$; $48.8°$.

תרגילים

פתרו כל אחד קודם על נייר, ואז בדקו.

1. מצאו את אורך הגל של Wi-Fi ב-2.4 GHz.

   12.5 cm.

2. בערך כמה זמן לוקח לאור השמש לעבור 1.5×10^{11} m?

   ≈ 8.3 דקות.

3. מצאו את הזווית הקריטית מזכוכית ($n = 1.5$) לאוויר.

   41.8°.

4. אור לא מקוטב עובר שני מקטבים בזווית $60°$. איזה חלק מהאור היוצא מהראשון עובר את השני?

   $\cos^2 60° = 0.25$.

5. עצם נמצא 30 cm מעדשה עם מוקד 10 cm. היכן הדמות?

   $1/d_i = 1/10 - 1/30$, $d_i = 15$ cm, ממשית והפוכה.

6. הפס התרמי 10 של Landsat 9 הוא סביב 11 μm. מצאו את אנרגיית הפוטון.

   ≈ 0.113 eV, הרבה פחות מפוטונים נראים: חיישנים תרמיים קוראים חום, לא צבע.

תפיסות שגויות נפוצות

מיתוס: אור צריך תווך.
בפועל: גלים אלקטרומגנטיים נעים בריק.

מיתוס: רדיו ואור הם דברים שונים.
בפועל: אותם גלים, אורכי גל שונים.

מיתוס: אור מתרחק מהאנך כשהוא נכנס למים.

בפועל: לעבר האנך: הוא מאט.

כרטיסיות

משוואות מקסוול

גאוס (B ,E), פאראדיי, אמפר–מקסוול.

זרם העתקה

$\varepsilon_0\, d\Phi_E/dt$.

מהירות האור

$c = 1/\sqrt{(\mu_0\varepsilon_0)}$.

יחס הגל

$c = f\lambda$.

אנרגיית פוטון

$E = hf$.

חוק סנל

$n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2$.

זווית קריטית

$\sin\theta_c = n_2/n_1$.

חוק מאלוס

$I = I_0 \cos^2\theta$.

עדשה דקה

$1/f = 1/d_o + 1/d_i$.

בוחן לבדיקה עצמית

1. איבר זרם ההעתקה נוסף על ידי…

פאראדיי

Ampère

מקסוול

גאוס

מקסוול. חוק אמפר–מקסוול.

2. בגל אלקטרומגנטי, E ו-B הם...

מקבילים

ניצבים זה לזה ולכיוון התנועה

לאורך התנועה

לא קשורים

ניצבים זה לזה ולכיוון התנועה. גלים רוחביים.

3. תדירות גבוהה יותר פירושה...

λ ארוך יותר, פחות אנרגיה לפוטון

λ קצר יותר, יותר אנרגיה לפוטון

גלים איטיים יותר

אין שינוי

λ קצר יותר, יותר אנרגיה לפוטון. $c = f\lambda$; $E = hf$.

4. החזרה פנימית מלאה מתרחשת כשאור עובר...

מאוויר למים

ממים לאוויר מעבר ל-θ_c

בכל תווך

מריק לזכוכית

ממים לאוויר מעבר ל-θ_c. מצפוף לפחות צפוף.

לנסות שוב את הבוחן

איך זה עוזר להציל את כדור הארץ

לווויינים צופים בכוכב על ידי מדידת גלים אלקטרומגנטיים. NASA מפרטת את הפסים של Landsat 9, מפס החוף/אירוסולים ב-0.43 µm, דרך הנראה, האינפרה-אדום הקרוב והאינפרה-אדום של גלים קצרים, ועד האינפרה-אדום התרמי ב-10.60–12.51

μm. לפי NASA, התצפיות האלה תומכות בהתרעות על בירוא יערות טרופיים, בניטור איכות מים ובדוחות על מצב גידולים, והחיישן התרמי מודד את טמפרטורת פני הקרקע כדי לסייע בניהול מים באזורים מועדים לבצורת. כל פס הוא פרוסה של הספקטרום שנבחרה משום שקרקע, מים וצמחים מחזירים או פולטים אותה באופן שונה.

הסיור של NASA בספקטרום האלקטרומגנטי מראה איך כל פס, מרדיו ועד קרני גמא, משמש לחקר כדור הארץ והחלל.

ב־GOES-19 · Saving Planets: Landsat 9 · תצפית על כדור הארץ

מקורות: NASA Landsat Science: Landsat 9 instruments and spectral bands (https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-9/landsat-9-instruments/) · NASA Science: Tour of the electromagnetic spectrum (https://science.nasa.gov/ems/)

מקורות לימוד חינמיים

- OpenStax UP2, 16.1 Maxwell's equations and electromagnetic waves (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/16-1-maxwells-equations-and-electromagnetic-waves): מקסוול.
- OpenStax UP2, 16.3 Energy carried by EM waves (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/16-3-energy-carried-by-electromagnetic-waves): עוצמה.
- OpenStax UP2, 16.5 The electromagnetic spectrum (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/16-5-the-electromagnetic-spectrum): ספקטרום.
- OpenStax UP3, 1.3 Refraction (https://openstax.org/books/university-physics-volume-3/pages/1-3-refraction): חוק סנל.
- OpenStax UP3, 1.7 Polarization (https://openstax.org/books/university-physics-volume-3/pages/1-7-polarization): קיטוב.
- OpenStax UP3, 2.4 Thin lenses (https://openstax.org/books/university-physics-volume-3/pages/2-4-thin-lenses): עדשות.
- PhET: Bending Light (https://phet.colorado.edu/en/simulations/bending-light): אינטראקטיבי.

צפו בהרצאה

Maxwell's Equations and Electromagnetic Waves I (https://oyc.yale.edu/physics/phys-201/lecture-14) (באנגלית)

Ramamurti Shankar, PHYS 201 Fundamentals of Physics II, Open Yale Courses. רישיון: CC BY-NC-SA 3.0 US (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/us/) · תנאי שימוש (https://oyc.yale.edu/terms). הקישור מיועד ללימוד חינמי בלבד; Saving Planets אינו קשור לאוניברסיטה זו ואינו נתמך על ידה.

סיימתי את היחידה הזו

תרגילים

התרגילים האלה נמצאים בתוך כל יחידה. פתרו על הנייר, ואז פתחו את התשובה.

1. מטען, חוק קולון ושדות חשמליים
   4 תרגילים
2. חוק גאוס
   4 תרגילים
3. פוטנציאל חשמלי וקיבול
   4 תרגילים
4. זרם, התנגדות ומעגלי זרם ישר
   4 תרגילים

5. שדות וכוחות מגנטיים
   4 תרגילים
6. מקורות של שדות מגנטיים: ביו–סבאר ואמפר
   4 תרגילים
7. השראה אלקטרומגנטית: פאראדיי ולנץ
   4 תרגילים
8. השראות, מעגלי RL ו-LC
   4 תרגילים
9. מעגלי זרם חילופין, שנאים ורשת החשמל
   4 תרגילים
10. משוואות מקסוול, גלים אלקטרומגנטיים ואופטיקה
    6 תרגילים

המעבדה (PHYS 210L)

המעבדה היא החלק המעשי של הקורס, רכיב של נקודת זכות 1 בתוכנית לימודים טיפוסית במכללה. כאן היא חינמית ולתרגול בלבד.

כל מעבדה אפשר לבצע במלואה בסימולציית PhET חינמית, ולרובן יש גם גרסה ביתית שמשתמשת רק בסוללות של 9 V או פחות. לעולם אל תשתמשו בחשמל מהקיר, אל תפתחו מכשיר שמתחבר לשקע, ואל תקצרו סוללה.

מקור בטיחות: OSHA: Electrical safety (https://www.osha.gov/electrical)

מעבדה A: מיפוי שדות חשמליים ומשטחים שווי פוטנציאל

שבוע 2

מטרה: מדדו כיצד השדה של מטען נקודתי יורד עם המרחק, אשרו את חוק הריבוע ההפוך בהתאמת log-log, ומפו משטחים שווי פוטנציאל סביב דיפול.

$$E = \frac{kq}{r^2} \;\Rightarrow\; \log E = \log(kq) - 2\log r$$

E=(kq)/(r^2)\ \ E=(kq)-2 r

קו ישר בשיפוע 2− בגרף log-log

מהלך הניסוי

1. פתחו את PhET Charges and Fields. הציבו מטען יחיד של 1 nC+ והפעילו את הערכים והרשת.
2. השתמשו בחיישן השדה E ב-0.5, 1.0, 1.5 ו-2.0 m ורשמו את E.
3. שרטטו log E מול log r והתאימו קו; השוו את השיפוע ל-2− ואת נקודת החיתוך ל-log(kq).
4. הוסיפו מטען של 1 nC− במרחק 1 m, השתמשו בכלי הוולטמטר כדי לעקוב אחר הקווים שווי הפוטנציאל 0 V ו-10 V±, ושרטטו קווי שדה ניצבים להם.

טבלת נתונים

r (m)	E (V/m)
0.5	35.95
1.0	8.99
1.5	3.99
2.0	2.25

ערכים שחושבו מ-$E = kq/r^2$ עבור $q = 1$ nC; קריאות הסימולציה שלכם צריכות להתאים עד כדי עיגול.

חישוב לדוגמה

1. מ-0.5 m ל-2.0 m (×4 ב-r), E יורד מ-35.95 ל-2.25 V/m (×1/16), ולכן שיפוע ה-log-log הוא 2−.
2. הקו שווה הפוטנציאל 0 V של הדיפול הוא האנך האמצעי בין שני המטענים, ובכל זאת השדה שם אינו אפס.

בטיחות

- אין, מעבר לשימוש רגיל במחשב.

חלופה ביתית או וירטואלית

- שפשפו בלון בשיער וצפו בו מרים פיסות נייר ממרחקים שונים: מבט איכותי על שדה שיורד מהר עם המרחק.

PhET: Charges and Fields (https://phet.colorado.edu/en/simulations/charges-and-fields) · PhET: Coulomb's Law (https://phet.colorado.edu/en/simulations/coulombs-law)

הקשר לכדור הארץ: במפות שדה כאלה מהנדסים מתכננים את השדות החשמליים בתוך תאים סולאריים וציוד מתח גבוה. U.S. DOE: How does solar work? (https://www.energy.gov/eere/solar/how-does-solar-work)

☐ **השלמתי את המעבדה הזו (רטובה או וירטואלית)**

מעבדה B: קיבול ומרחק בין הלוחות

שבוע 5

מטרה: מדדו כיצד הקיבול של קבל לוחות מקבילים תלוי במרחק בין הלוחות, וחלצו את ε_0 מהנתונים.

$$C = \frac{\varepsilon_0 A}{d}$$

`C=(_0A)/(d)`

שרטטו C מול 1/d; השיפוע הוא $\varepsilon_0 A$

מהלך הניסוי

1. פתחו את PhET Capacitor Lab: Basics. קבעו שטח לוח של 400 mm² וחברו את הסוללה ב-1.5 V.
2. קראו את C במרחקי לוחות של 2, 4, 6, 8 ו-10 mm.
3. שרטטו C מול 1/d והתאימו קו דרך הראשית; חלקו את השיפוע ב-A כדי לקבל ε_0.
4. ב-d = 5 mm, רשמו את האנרגיה האגורה והשוו ל-½CV².

טבלת נתונים

d (mm)	C (pF)
2	1.77
4	0.885
6	0.590
8	0.443
10	0.354

ערכים שחושבו מ-$C = \varepsilon_0 A/d$; הסימולציה מעגלת אותם.

חישוב לדוגמה

1. קבוע: $C \times d$ = 1.77 pF × 2 mm = 0.354 pF × 10 mm, ולכן $C \propto 1/d$.
2. שיפוע $\varepsilon_0 A = 3.54 \times 10^{-15}$ F·m, ולכן $\varepsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$ F/m = $3.54 \times 10^{-15} / (4 \times 10^{-4})$.
3. ב-5 mm, C = 0.708 pF ו-$U = \tfrac{1}{2}CV^2$ = 0.797 pJ ב-1.5 V.

בטיחות

- אין, מעבר לשימוש רגיל במחשב.

חלופה ביתית או וירטואלית

- רשות: עם מולטימטר שמודד קיבול, מדדו שתי פיסות נייר אלומיניום המופרדות בדף, שניים ושלושה דפי נייר. C אמור לרדת ככל שהערימה גדלה.

PhET: Capacitor Lab: Basics (https://phet.colorado.edu/en/simulations/capacitor-lab-basics)

הקשר לכדור הארץ: קבלים מחליקים הספק במכוניות חשמליות, בממירים סולאריים וברשת; אותו $C = \kappa\varepsilon_0 A/d$ קובע את גודלם.
FuelEconomy.gov (DOE/EPA): All-electric vehicles (https://www.fueleconomy.gov/feg/evtech.shtml)

☐ **השלמתי את המעבדה הזו (רטובה או וירטואלית)**

מעבדה C: חוק אוהם, כללי קירכהוף וקבוע זמן RC

שבוע 7

מטרה: אשרו את חוק אוהם, בדקו את כללי קירכהוף במעגל בעל שתי לולאות, ומדדו את קבוע הזמן של קבל נטען.

$$V_C = V_0\left(1 - e^{-t/RC}\right)$$

```
V_C=V_0(1-e^-t/RC)
```

עקומת טעינה; ln(1 − V_C/V₀) = −t/RC הוא קו ישר

מהלך הניסוי

1. חוק אוהם: חברו נגד של 1 kΩ ל-1.5, 3.0, 4.5, 6.0 ו-9.0 V (סוללות AA בטור, או סוללת PhET) ורשמו את הזרם; שרטטו I מול V.
2. קירכהוף: ב-PhET Circuit Construction Kit: DC, בנו את המעגל של יחידה 4 (12 V, 6 V, 2 Ω, 3 Ω, 6 Ω) ומדדו את שלושת הזרמים; בדקו את סכומי הצומת והלולאה.
3. RC: טענו קבל של 100 µF מ-9 V דרך 10 kΩ, וקראו את V_C כל שנייה; שרטטו ln(1 − V_C/9) מול t ומצאו את RC מהשיפוע.

טבלת נתונים

t (s)	V_C (V), 10 kΩ ו-100 µF מ-9 V
0	0.00
1	5.69
2	7.78
3	8.55
5	8.94

ערכים שחושבו לרכיבים אידיאליים; קבלים אמיתיים סוטים לעתים קרובות ב-±20% מהערך המסומן, ולכן ה-ז שלכם עשוי להיות שונה.

חישוב לדוגמה

1. חוק אוהם: שיפוע I מול V הוא 1 mA/V, ולכן R = 1.00 kΩ; ב-9 V הנגד מפזר רק 81 mW.
2. קירכהוף: 2 A − 0.667 A = 1.33 A בצומת, ו-12 − 2(2) − 6(1.33) = 0 סביב לולאה 1.
3. RC: לקו של ln(1 − V_C/9) שיפוע −1.0 s⁻¹, ולכן τ = (10 kΩ)(100 µF) = 1.0 s.

בטיחות

- השתמשו רק בסוללות של 9 V או פחות; לעולם לא בחשמל מהקיר.
- לעולם אל תחברו תיל ישירות בין הדקי סוללה: הוא מתחמם מהר ועלול לשרוף.

- לקבלים אלקטרוליטיים יש רגל +; חברו אותה לכיוון הצד + של הסוללה, והשתמשו בקבל שמתחו הנקוב מעל 9 V.

חלופה ביתית או וירטואלית

- הכול כאן עובד עם מולטימטר, סוללות AA, סוללת 9 V, נגדים וקבל על מטריצה; תזמנו את קריאות ה-RC בצילום וידאו של המד בטלפון.

PhET: Circuit Construction Kit: DC (https://phet.colorado.edu/en/simulations/circuit-construction-kit-dc) · PhET: Ohm’s Law (https://phet.colorado.edu/en/simulations/ohms-law) · PhET: Resistance in a Wire (https://phet.colorado.edu/en/simulations/resistance-in-a-wire)

הקשר לכדור הארץ: מערכים סולאריים מחווטים לפי אותם כללים: שרשראות בטור מעלות מתח ושרשראות במקביל מעלות זרם. U.S. DOE: How does solar work? (https://www.energy.gov/eere/solar/how-does-solar-work)

☐ **השלמתי את המעבדה הזו (רטובה או וירטואלית)**

מעבדה D: מדידת שדות מגנטיים, כולל של כדור הארץ

שבוע 9

מטרה: מדדו את השדה המגנטי של כדור הארץ במגנטומטר של טלפון, מפו את השדה של תיל בסימולציה, והשוו את שניהם לתיאוריה.

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$$

B=(μ_0I)/(2π r)

שדה של תיל ארוך

מהלך הניסוי

1. פתחו אפליקציית מגנטומטר הרחק ממתכת ומאלקטרוניקה. רשמו את עוצמת השדה הכוללת בחמש נקודות ומצעו.
2. השוו לטווח ש-NOAA מציינת, כ-25000–65000 nT על פני כדור הארץ.
3. ב-PhET Magnets and Electromagnets, ראו איך השדה משתנה עם הזרם ומספר הכריכות; ואז חשבו את B לתיל ארוך עם I = 1, 2 A ב-r = 4 cm ושרטטו B מול 1/r.
4. קרבו מגנט מקרר לטלפון ורשמו את המרחק שבו השדה שלו שווה לשדה של כדור הארץ.

טבלת נתונים

r (cm)	B לתיל של 2 A (μT)
1	40
2	20
4	10

ערכי התיל חושבו מ-$\mu_0 I/(2\pi r)$. קריאות שדה כדור הארץ תלויות במיקומכם; המחשבון של NOAA נותן את הסך הצפוי למקומכם.

חישוב לדוגמה

1. $B \propto 1/r$: הכפלת המרחק חוצה את השדה, ולכן הגרף של B מול 1/r הוא קו ישר דרך הראשית בשיפוע $\mu_0 I/(2\pi) = 0.4\ \mu T\cdot m$.
2. תיל של 2 A משתווה לשדה כדור הארץ של 50 μT ב-$r = \mu_0 I/(2\pi \times 50\ \mu T) = 0.8$ cm.

בטיחות

- הרחיקו מגנטים חזקים מחריצי כרטיסים בטלפונים, מקוצבי לב ומכרטיסי אשראי.
- אל תעבירו זרם גבוה בתיל חשוף בבית; חלק התיל במעבדה הזו נעשה בסימולציה.

חלופה ביתית או וירטואלית

- שלבי המגנטומטר ומגנט המקרר הם הגרסה הביתית.

PhET: Magnets and Electromagnets (https://phet.colorado.edu/en/simulations/magnets-and-electromagnets) · PhET: Magnet and Compass (https://phet.colorado.edu/en/simulations/magnet-and-compass) · NOAA magnetic field calculators (https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/calculators/magcalc.shtml)

הקשר לכדור הארץ: הכרת השדה הרגיל היא קו הבסיס לזיהוי סופות גיאומגנטיות, ש-NOAA מזהירה שעלולות להשרות זרמים מזיקים ברשתות חשמל. NOAA NCEI: Geomagnetism frequently asked questions (https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/faqge om.shtml) · NOAA Space Weather Prediction Center: Geomagnetic storms (https://www.swpc.noaa.gov/phenomena/geomagnetic-storms)

☐ **השלמתי את המעבדה הזו (רטובה או וירטואלית)**

מעבדה E: השראה ומודל של גנרטור

שבוע 10

מטרה: הראו שהכא"מ המושרה תלוי בקצב השינוי של השטף, ושכא"מ השיא של גנרטור גדל ביחס ישר לקצב הסיבוב שלו.

$$\varepsilon_{\max} = NBA\omega$$

_=NBAω

כא"מ שיא של סליל מסתובב

מהלך הניסוי

1. ב-PhET Faraday’s Law, דחפו את המגנט דרך הסליל לאט ואז מהר; רשמו את קריאת מתח השיא בכל פעם ושימו לב להיפוך הסימן כשהוא יוצא.
2. ב-PhET Faraday’s Electromagnetic Lab (לשונית Generator), שנו את מהירות הטורבינה ורשמו את תגובת השיא של הנורה או הוולטמטר.
3. חשבו את ε_max לסליל מודל עם N = 200, A = 0.01 m² ו-B = 0.05 T ב-1, 2 ו-3 סיבובים לשנייה.
4. בבית: לפפו 100 כריכות של תיל דק מבודד סביב גליל נייר טואלט, חברו מולטימטר על mV, והפילו דרכו מגנט חזק.

טבלת נתונים

קצב סיבוב (סיבובים/s)	כא"מ שיא (V)
1	0.628
2	1.26
3	1.88

ערכים שחושבו לסליל המודל (ערכים לדוגמה).

חישוב לדוגמה

1. ε_max = NBA(2πf) = 200 × 0.05 × 0.01 × 2π f = 0.628 V לכל סיבוב/s, ולכן הכפלת המהירות מכפילה את הכא"מ.
2. מגנט מהיר יותר נותן פולס גבוה וקצר יותר; השטח מתחת לעקומת הכא"מ-זמן (שינוי השטף הכולל N ×) נשאר זהה.

בטיחות

- מגנטי ניאודימיום חזקים נצמדים בעוצמה ויכולים לצבוט עור או להתנפץ; טפלו בהם אחד בכל פעם.
- הרחיקו מגנטים מקוצבי לב ומאלקטרוניקה.

חלופה ביתית או וירטואלית

- שלב הסליל והמגנט הוא הגרסה הביתית; כל מולטימטר בתחום המילי-וולט מתאים.

PhET: Faraday’s Law (https://phet.colorado.edu/en/simulations/faradays-law) · PhET: Faraday’s Electromagnetic Lab (https://phet.colorado.edu/en/simulations/faradays-electromagnetic-lab) · PhET: Generator (https://phet.colorado.edu/en/simulations/generator)

הקשר לכדור הארץ: כל טורבינת רוח ותחנה הידרואלקטרית מריצה את המעבדה הזו בקנה מידה של מגה-וואט: הטורבינה מסובבת גנרטור כדי לייצר חשמל. משרד האנרגיה האמריקאי: איך פועלות טורבינות רוח? (באנגלית) (https://www.energy.gov/eere/wind/how-do-wind-turbines-work) · U.S. DOE: How hydropower works (https://www.energy.gov/eere/water/how-hydropower-works)

- [ ] **השלמתי את המעבדה הזו (רטובה או וירטואלית)**

מעבדה F: שבירה וחוק סנל

שבוע 14

מטרה: מדדו זוויות שבירה מאוויר למים, מצאו את מקדם השבירה, וצפו בהחזרה פנימית מלאה.

$$n = \frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2}$$

n=(θ_1)/(θ_2)

שיפוע sin θ₁ מול sin θ₂

מהלך הניסוי

1. ב-PhET Bending Light, קבעו את התווך התחתון למים וכוונו את הלייזר מ-10° עד 60° מהאנך בצעדים של 10°; קראו את זווית השבירה בכלי המד-זווית.
2. שרטטו sin θ₁ מול sin θ₂ והתאימו קו דרך הראשית; השיפוע הוא n.
3. הכניסו את הלייזר למים והגדילו את הזווית עד שהאלומה הנשברת נעלמת; רשמו את הזווית הקריטית.
4. בבית: כוונו לייזר בהספק נמוך או אלומה צרה של פנס לתוך קופסה שקופה עם מים וטיפת חלב, ומדדו את הזוויות על מד-זווית מודפס.

טבלת נתונים

θ₁ באוויר (°)	θ₂ במים (°)
10	7.5
20	14.9
30	22.1
40	28.9
50	35.2
60	40.6

ערכים שחושבו מחוק סנל עם n = 1.33.

חישוב לדוגמה

1. n = sin 30°/sin 22.1° = 0.500/0.376 = 1.33, וכל שורה נותנת את אותו יחס.
2. זווית קריטית ממים לאוויר: sin⁻¹(1/1.33) = 48.8°.

בטיחות

- השתמשו רק במצביע לייזר מדרגה 2 (פחות מ-1 mW), לעולם אל תסתכלו לתוך האלומה ואל תכוונו אותה לעיני מישהו; היזהרו מהחזרות מהמים ומהזכוכית.

חלופה ביתית או וירטואלית

- שלב קופסת המים הוא הגרסה הביתית.

PhET: Bending Light (https://phet.colorado.edu/en/simulations/bending-light)

הקשר לכדור הארץ: חיישני לוויין בנויים מעדשות, מראות ומסננים שתוכננו לפי אותם חוקי שבירה והחזרה. NASA Landsat Science: Landsat 9 instruments and spectral bands (/https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-9/landsat-9-instruments)

☐ **השלמתי את המעבדה הזו (רטובה או וירטואלית)**

מערכי תרגול למבחן

מדדו זמן: כ־10 דקות לבעיה. אחר כך השוו לפתרונות המלאים.

סט תרגול לבחינת אמצע (יחידות 5–1)

1. מטענים של +2.0 μC ו-+8.0 μC נמצאים במרחק 0.30 m. מצאו את הכוח ביניהם ואת הנקודה ביניהם שבה E = 0.

   1. $F = k(2 \times 10^{-6})(8 \times 10^{-6})/0.09$.
   2. $k(2)/x^2 = k(8)/(0.3 - x)^2$ נותן $x = 0.10$ m.

   תשובה: 1.60 N, דחייה; 0.10 m מהמטען של 2.0 μC.

2. משטח סגור מקיף מטען של 3.0 nC. מצאו את השטף נטו.

   1. $\Phi = Q/\varepsilon_0$.

   תשובה: ≈ 339 N·m²/C.

3. קבל של 10 μF טעון ל-12 V. מצאו את Q ואת U.

   1. $Q = CV$; $U = \tfrac{1}{2}CV^2$.

   תשובה: 120 μC; 0.72 mJ.

4. סוללה של 9 V מזינה 3 Ω בטור עם זוג מקבילי של 6 Ω ו-3 Ω. מצאו את הזרם ואת ההספק הכולל.

   1. זוג מקבילי 2 Ω =; סך הכול 5 Ω.
   2. $I = 9/5$; $P = IV$.

   תשובה: 1.8 A; 16.2 W.

5. פרוטון נע ב-1.0×10^6 m/s לרוחב שדה של 0.20 T. מצאו את רדיוס המסלול.

.r = mv/(eB) .1

תשובה: ≈ 5.22 cm.

מערך תרגול מסכם (כל היחידות)

1. מצאו את B במרחק 0.10 m מתיל ארוך הנושא 50 A.

.B = μ₀I/(2πr) .1

תשובה: 100 μT, בערך פי שניים מהשדה של כדור הארץ.

2. סליל של 50 כריכות בשטח 0.05 m² מסתובב ב-50 סיבובים/s בשדה של 0.20 T. מצאו את כא"מ השיא.

.ε = NBAω, ω = 2π × 50 .1

תשובה: ≈ 157 V.

3. במעגל RL יש L = 0.5 H ו-R = 100 Ω. מצאו את τ ואת החלק מהזרם הסופי אחרי 5 ms.

.τ = L/R .1

תשובה: 5 ms; 63%.

4. שלחו 50 MW ב-230 kV בקו עם התנגדות 5 Ω. מצאו את הזרם ואת ההפסד.

.I = P/V .1; הפסד = I²R.

תשובה: 217 A; 0.236 MW (0.47%).

5. מצאו את התדירות ואנרגיית הפוטון של אור באורך גל 500 nm.

.f = c/λ; E = hf .1

תשובה: 6.00 × 10¹⁴ Hz; 2.48 eV.

6. אור נכנס לזכוכית (n = 1.5) בזווית 45°. מצאו את זווית השבירה.

.sin θ₂ = sin 45°/1.5 .1

תשובה: 28.1°.

דף נוסחאות

$$F = k|q_1 q_2|/r^2$$

$$\vec{E} = \vec{F}/q$$

$$\oint \vec{E}\cdot d\vec{A} = Q_{\text{enc}}/\varepsilon_0$$

$$V = kq/r,\ E_x = -dV/dx$$

$$C = \kappa\varepsilon_0 A/d,\ U = \tfrac{1}{2}CV^2$$

$$V = IR,\ R = \rho L/A,\ P = IV$$

$$\tau = RC,\ \tau = L/R$$

$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B},\ r = mv/(qB)$$

$$\vec{F} = I\vec{L} \times \vec{B},\ \tau = NIAB\sin\theta$$

$$B = \mu_0 I/(2\pi r),\ B = \mu_0 nI$$

$$\varepsilon = -N\, d\Phi_B/dt,\ \varepsilon = BLv$$

$$L = \mu_0 N^2 A/l,\ U = \tfrac{1}{2}LI^2$$

$$X_L = \omega L,\ X_C = 1/(\omega C),\ Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C$$

$$V_2/V_1 = N_2/N_1$$

$$c = 1/\sqrt{\mu_0\varepsilon_0} = f\lambda,\ E = hf$$

$$n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2,\ 1/f = 1/d_o + 1/d_i$$

קבועים

קבוע	ערך
מטען יסודי, e	1.602 × 10⁻¹⁹ C
קבוע קולון, k = 1/(4πε₀)	8.988 × 10⁹ N·m²/C²
מקדם היתירות של הריק, ε₀	8.854 × 10⁻¹² F/m
חדירות הריק, μ₀	1.257 × 10⁻⁶ T·m/A (≈ 4π × 10⁻⁷)
מהירות האור, c	2.998 × 10⁸ m/s
מסת האלקטרון, mₑ	9.109 × 10⁻³¹ kg
מסת הפרוטון, mₚ	1.673 × 10⁻²⁷ kg
קבוע פלאנק, h	6.626 × 10⁻³⁴ J·s

מקור: NIST: קבועים פיזיקליים יסודיים (באנגלית) (https://physics.nist.gov/cuu/Constants/)

טקסטים וסימולציות בחינם

השתמשו בספרים, בהרצאות ובסימולציות החינמיים האלה לצד הקורס.

- OpenStax University Physics Volume 2 (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/1-introduction): ספר לימוד חינמי ומלא לקורס הזה.
- MIT OpenCourseWare 8.02 Physics II: Electricity and Magnetism (https://ocw.mit.edu/courses/8-02-physics-ii-electricity-and-magnetism-spring-2019/): הרצאות, מטלות ומבחנים של MIT בחינם.

- OpenStax University Physics Volume 3 (optics) (https://openstax.org/books/university-physics-volume-3/pages/1-2-the-law-of-reflection): פרקי אופטיקה חינמיים ליחידה 10.
- PhET: Charges and Fields (https://phet.colorado.edu/en/simulations/charges-and-fields): הציבו מטענים ומפו שדות ומשטחים שווי פוטנציאל.
- PhET: Circuit Construction Kit: DC (https://phet.colorado.edu/en/simulations/circuit-construction-kit-dc): בנו ומדדו מעגלים.
- PhET: Faraday's Electromagnetic Lab (https://phet.colorado.edu/en/simulations/faradays-electromagnetic-lab): מגנטים, סלילים, גנרטורים ושנאים.

מילון מונחים

חוק אמפר
$\oint B \cdot dl = \mu_0 I_{enc}$.

קיבול
מטען אגור לכל וולט, $C = Q/V$.

חוק קולון
כוח בין מטענים נקודתיים, $F = k|q_1 q_2|/r^2$.

זווית קריטית
הזווית שמעבר לה האור מוחזר כולו בתוך תווך צפוף יותר.

זרם העתקה
$\varepsilon_0 \, d\Phi_E/dt$, התוספת של מקסוול לחוק אמפר.

EMF
אנרגיה ליחידת מטען שמספק מקור כמו סוללה או גנרטור.

שדה חשמלי
כוח ליחידת מטען.

פוטנציאל חשמלי
אנרגיה פוטנציאלית ליחידת מטען, בוולט.

חוק פאראדיי
שטף מגנטי משתנה משרה כא"מ.

חוק גאוס
השטף החשמלי נטו היוצא ממשטח סגור שווה ל-Q_{enc}/ε_0.

זרם מושרה גיאומגנטית
זרם שסופות גיאומגנטיות מניעות ברשתות ובצנרות.

עכבה
ההתנגדות הכוללת לזרם חילופין, Z.

השראות
כא"מ לקצב שינוי של זרם, בהנרי.

חוק לנץ
הזרם המושרה מתנגד לשינוי בשטף.

שטף מגנטי

$\Phi_B = \int B \cdot dA$, בוובר.

משוואות מקסוול

ארבעה חוקים המאחדים חשמל, מגנטיות ואור.

מקדם הספק

$\cos \varphi$, החלק מההספק המדומה שמבצע עבודה.

ערך RMS

שורש ממוצע הריבועים, $V_0/\sqrt{2}$ לגל סינוס.

התנגדות סגולית

תכונת החומר ρ ב-$R = \rho L/A$.

חוק סנל

$n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2$.

שנאי

שני סלילים מצומדים המשנים מתח חילופין.

מחוון להערכה עצמית

לא ניתנים ציון או נקודות זכות. השתמשו בזה כדי להעריך בכנות איפה אתם עומדים בכל יחידה.

רמה	איך זה נראה
4 · שליטה מלאה	בונה שדות ומעגלים מתוך תיאור, בוחר את החוק הנכון, מטפל בסימנים ובכיוונים, ובודק יחידות ומקרי קצה.
3 · מיומן	פותר את תרגילי האימון עם טעויות סימן או יחידות מדי פעם.
2 · מתפתח	עוקב אחר דוגמאות פתורות אך מתקשה לבחור משטח גאוס, לולאה או כלל יד ימין.
1 · מתחיל	מציב מספרים בנוסחאות בלי שרטוט; צריך לחזור על היחידה.

שקלול מוצע אם רוצים ציון

חלק	משקל
תרגילים	25%
מעבדות (PHYS 210L)	20%
מערך תרגול לאמצע הקורס	25%
מערך תרגול מסכם	30%

שאפו לרמה 3 ומעלה בכל יחידה לפני שעוברים לקורס הבא.

קורסים קשורים

- משוואות דיפרנציאליות MATH 220
- סטטיקה ENGR 211
- חשבון אינפיניטסימלי 3 MATH 210
- כל הקורסים