

מידת "מתחים" וזרמים חשמליים בשדה חשמלי רוטציוני

צבי גלר ואורי גניאל, המחלקה להוראת המדעים, מכון ויצמן למדע, רחובות

תקציר: במאמר מובאים ניסויים המדגימים את ההבדלים בין שדה חשמלי "אלקטרוסטטי", הנוצר כתוצאה מהפרדת מטענים הנגרמת על ידי תנועת מוליך בשדה מגנטי, לבין השדה החשמלי הלא משמר, הרוטציוני, הנוצר על ידי שינוי בזמן של שדה מגנטי.
מילות מפתח: שדה חשמלי אלקטרוסטטי, שדה משמר, הפרש פוטנציאלים, שדה חשמלי רוטציוני, שדה לא משמר, כא"מ מושרה תנועתית, כא"מ מושרה על ידי שדה מגנטי משתנה בזמן.

מבוא

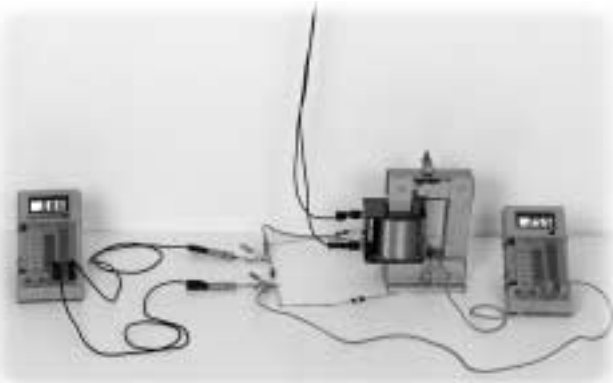
בבתי הספר התיכוניים, כאשר מלמדים פרקי אלקטרומגנטיות ברמה של 4 או 5 יחידות לימוד, מתייחסים בדרך כלל לקיומם של שני סוגים של שדות חשמליים: שדות חשמליים "אלקטרוסטטיים" – שהם שדות משמרים, ושדות חשמליים "רוטציוניים" שאינם משמרים¹.

העובדה ששדות אלקטרוסטטיים הם שדות משמרים, מאפשרת להגדיר לגביהם פונקציה סקלארית של פוטנציאל חשמלי, כך שבין כל שתי נקודות בשדה אלקטרוסטטי קיים הפרש פוטנציאלים קבוע ומוגדר היטב. ניתן למדוד הפרש כזה באמצעות מד-מתח (וולטמטר) מתאים המחובר לשתי הנקודות.

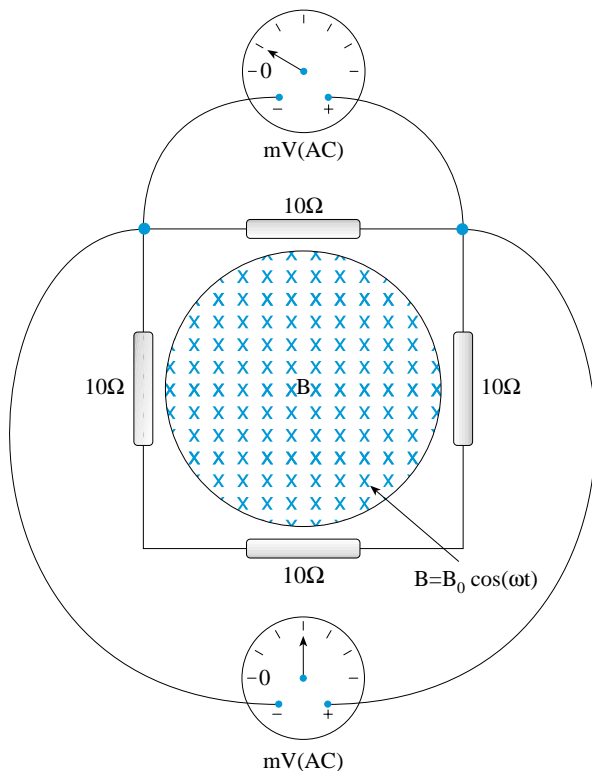
לעומת זאת, בשדה חשמלי רוטציוני - שדה אשר נוצר כתוצאה משינוי בזמן של שדה מגנטי - לא ניתן להגדיר פוטנציאל אלקטרוסטטי. ממילא לא קיים הפרש פוטנציאלים מוגדר בין נקודות השדה, כלומר שני וולטמטרים תקינים ומדויקים המחוברים לשתי נקודות בשדה זה, לא מראים בהכרח תוצאות מדידה שוות.

הדיון בכיתה בעובדות חשובות אלה הוא בדרך כלל קצר, עם דגש על הצד התיאורטי, ורק לעיתים רחוקות מלווים דיון זה בהדגמות או בביצוע ניסויים מתאימים.

דוגמה של ניסוי המראה ששדה חשמלי רוטציוני איננו שדה משמר, מובאת בחוברת החמישית של המהדורה הראשונה של "מעוף"²: באמצעות שני וולטמטרים דיגיטליים **למתח חילופין**, המחוברים במקביל, מודדים את ה"מתח" בין שתי נקודות בשדה החשמלי המושרה שנוצר עקב השינוי בזמן של השדה המגנטי של אלקטרומגנט. **תרשים 1א** הוא תצלום המערכת שבאמצעותה בוצע הניסוי (ראה גם **תרשים 1ב**, שהוא סרטוט סכימטי של הניסוי): ארבעה נגדים שווים בעלי התנגדות של 10Ω כל אחד מחוברים זה לזה בצורת ריבוע



תרשים 1א: תצלום המערכת שבאמצעותה בוצע הניסוי ב-AC.



תרשים 1ב: תיאור סכימטי של הניסוי המוצג בתרשים 1א.

בסרטוט המתאים (תרשים 1ד), רואים כי תיל אחד של הוולטמטר השלישי מחובר לנקודה שבין שני הנגדים, והתיל האחר מקיף את הסליל ומחובר אל **אותה נקודה**. הוראת וולטמטר זה היא **סכום הוראות** שני הוולטמטרים האחרים:

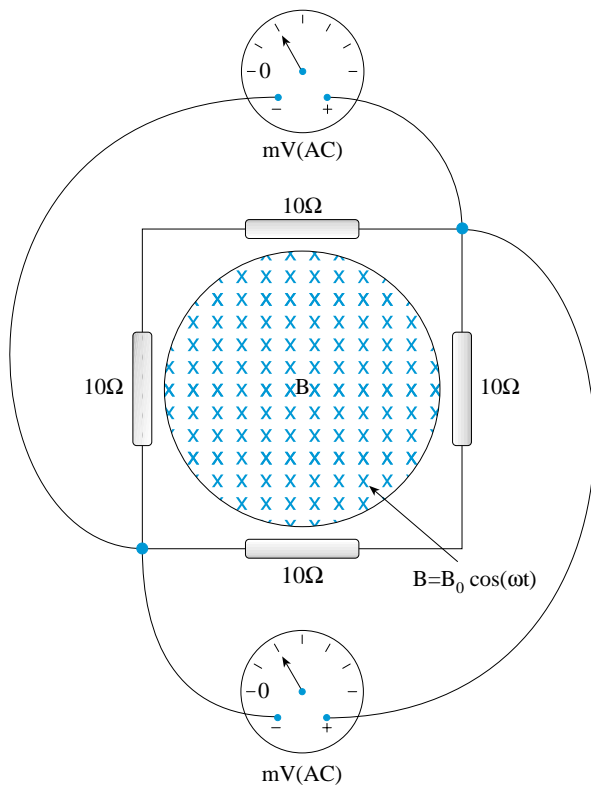
זהו הכא"מ המושרה בלולאה המקיפה את הסליל. אם יחברו את שני הוולטמטרים לרביעיית הנגדים "באופן סימטרי", כלומר בצורה המתוארת סכימטית בתרשים 1ה, הם ימדדו "מתחים אפקטיביים" שווים; מאחר שהוולטמטר לזרם חילופין מודד מתח אפקטיבי, לא ניתן לבדוק כך האם קיים הפרש מופע בין שני "מתחים" אלה. כאמור, ניסוי פשוט ויפה זה מבוצע במעגל של זרם חילופין, אולם בשלב שבו התלמידים לומדים על כא"מ מושרה הנוצר עקב שינוי בזמן של שדה מגנטי, הם בדרך כלל אינם בקיאים עדיין בנושא "מעגלי זרם חילופין". לפיכך ביצענו סידרה של ניסויים **במעגלי זרם ישר** שיאפשרו לתלמידינו, כך אנחנו מקווים, להבין טוב יותר את התכונות השוות ואת התכונות השונות של שני סוגי השדות החשמליים. במאמר זה נתאר סידרת ניסויים זו.

המקיף את הסליל של אלקטרומגנט המחובר למקור מתח חילופין. אף על פי ששני הוולטמטרים מחוברים לאותן שתי נקודות ברביעיית הנגדים, הוראות שני הוולטמטרים **אינן שוות**.

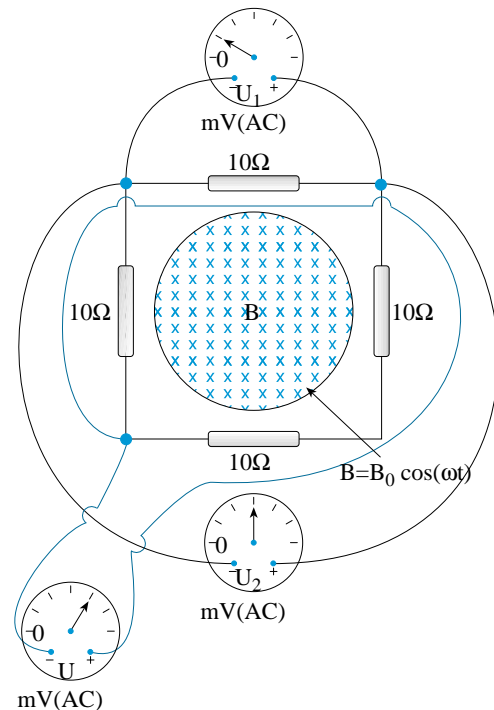
כדאי לשים לב לכך שהוולטמטר המחובר ישירות, כלומר מבלי שהתילים עוברים מסביב לסליל, מורה כשליש ממה שמורה הוולטמטר השני. מעובדה זו ניתן להסיק את ההסבר לתופעה שלפנינו אך לא נדון בו כאן. נעיר כי סכום שתי ההוראות הוא הכא"מ המושרה בלולאה שלמה המקיפה את הסליל. להשלמת התמונה כדאי לערוך ניסוי נוסף, אשר בו נשתמש בוולטמטר שלישי; שני וולטמטרים יחוברו כמקודם, והשלישי יחובר כמוראה בתצלום (תרשים ג1).



תרשים ג1: תצלום המערכת בה מחוברים שלושה וולטמטרים



תרשים 1ה: שני הוולטמטרים המחוברים באופן סימטרי, מודדים "מתחים אפקטיביים" שווים, אבל לא מראים את הפרש המופע ביניהם.

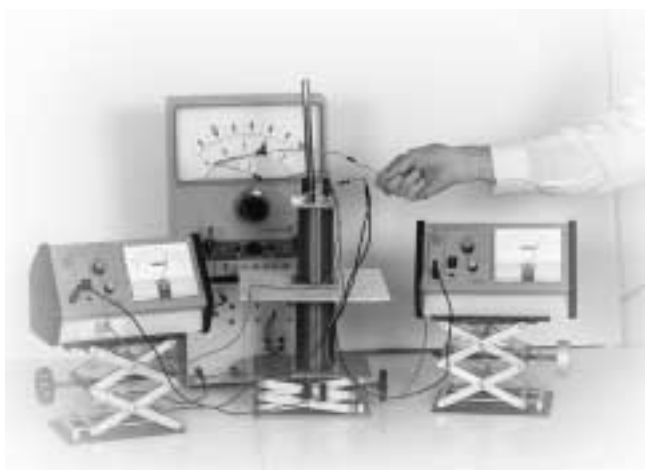
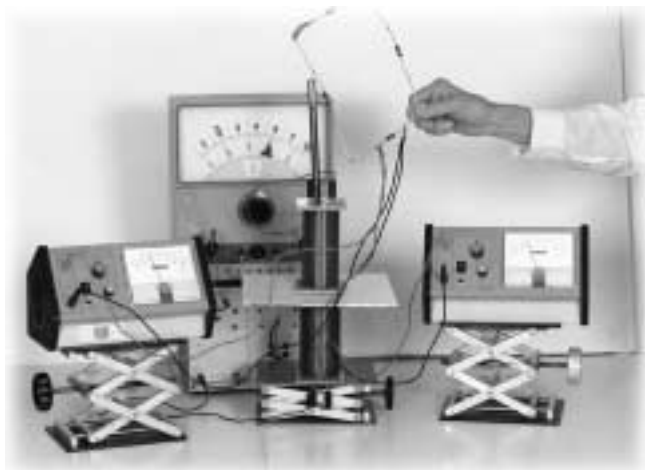


תרשים 1ד: סרטוט סכמטי של המערכת המופיעה בתרשים ג1. הוולטמטר השלישי המקיף את הסליל כולו מראה את סכום ההוראות של הוולטמטרים האחרים: $U = U_1 + U_2$

תיאור הניסויים ותוצאותיהם

א. ניסוי ראשון

דרך שני הסלילים המחוברים בטור (כאשר מוט הברזל נמצא בתוכם), מזרימים באמצעות הספק והפוטנציומטר זרם חשמלי קבוע שעוצמתו 2A בקירוב. כתוצאה מכך יוצרים בסלילים ובסביבתם הקרובה שדה מגנטי חזק למדי. עתה, אם מזיזים את המסגרת של רביעיית הנגדים כך שהשטף המגנטי דרכה קטן או גדל, רואים כי כתוצאה מכך נוצרות סטיות שוות גודל וכיוון של מחוגי שני המיקרוולטמטרים המחוברים במקביל לשתי נקודות קבועות ברביעיית הנגדים (תרשימים 3א, 3ב).



תרשים 3א: בשתי התמונות שני המיקרוולטמטרים מחוברים במקביל לשני קצות אחד הנגדים ברביעיית הנגדים. כאשר מזיזים את מסגרת הנגדים באופן שהשטף המגנטי דרכה משתנה נוצרות סטיות שוות גודל וכיוון בשני המיקרוולטמטרים, ללא תלות במיקומם יחסית לנגדים ולשדה המגנטי של הסלילים.

סטיות הוולטמטרים אינן משתנות גם כאשר מעבירים את המיקרוולטמטרים ממקום למקום (בתנאי, כמובן, שהם

הציוד הדרוש לביצוע סידרת הניסויים (תרשים 2)

- מקור מתח ישר (ספק) של 24 וולט.
- ריאוסטט שהתנגדותו 20Ω בערך אשר יחובר למקור המתח וישמש כפוטנציומטר (דגם 0520 של "תוכנית רחובות" מתאים).
- 4 נגדים של 10Ω כל אחד המחוברים בצורת ריבוע.
- 2 מיקרוולטמטרים היכולים לשמש גם כנואמפרמטרים (017.021 ברשימת הציוד של חברת UniLab); למכשירים אלה התנגדות קבועה של 1000Ω בכל תחומי המדידה, וכשלא זורם בהם זרם חשמלי, המחוג שלהם מכוון למרכז הסקאלה.
- 2 סלילים בעלי 500 ליפופים כל אחד (דגם 0490 של "תוכנית רחובות").
- מד זרם ישר גדול להדגמה (תחום מדידה עד 3A).
- מוט ברזל המוכנס לתוך הסלילים כדי להגביר את השדה המגנטי שלהם.
- לוח עץ דק שאפשר להניח עליו את 4 הנגדים המחוברים בצורת ריבוע; במרכז הלוח חור עגול שדרכו אפשר להעביר את מוט הברזל וגם מספר תילים לפי הצורך (ראה תרשים 2).
- 4 תילים מוליכים ארוכים (אורך כל תיל כ-30 ס"מ) ו-4 תנינים בקצותיהם.
- 6 עד 8 תילים רגילים.
- 3 מתקני הרמה (גיקים) המשמשים להגבהת הסלילים והמיקרוולטמטרים.
- רצוי להצטייד גם בגלאי Hall כדי למדוד בעזרתו את השדה המגנטי של הסלילים.



תרשים 2: הציוד הדרוש לביצוע סידרת הניסויים במעגלי DC.

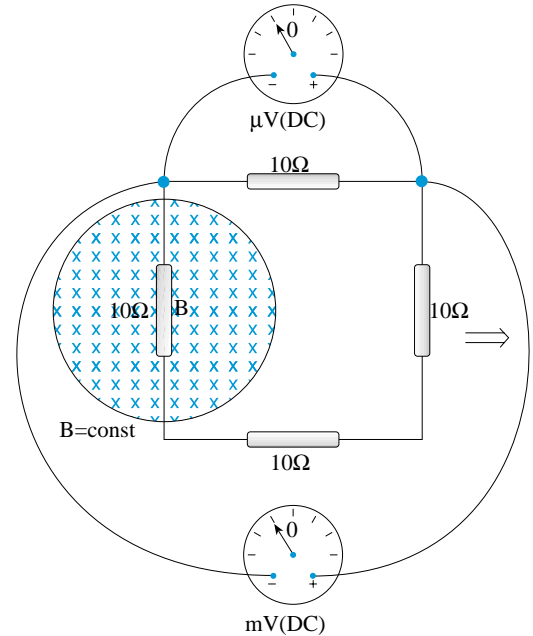
ב. ניסוי שני

זהו הניסוי העיקרי שתוצאותיו מפתיעות את התלמידים, ולעיתים אפילו מורים מנוסים.

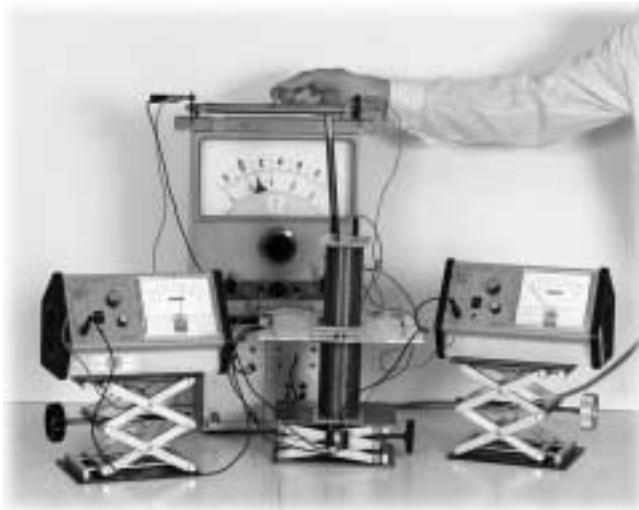
ב1. הכנת המערכת, הפעלתה וביצוע השלב הראשון של הניסוי.

מכניסים את לוח העץ עם החור במרכזו בין שני הסלילים, מניחים עליו את רביעיית הנגדים, ומחברים את הסלילים (כאשר מוט הברזל בתוכם) ואת האמפרמטר, המחובר אליהם בטור, לפוטנציומטר המחובר לספק. באמצעות "תנינים" מחברים שני זוגות של תילים ארוכים לשני הקצוות של אחד הנגדים ברביעייה, כך שזוג אחד של תילים מתְּבָּר את קצהו האחד של הנגד לשני השקעים החיוביים של שני המיקרוולטמטרים, והזוג השני של תילים מתְּבָּר את קצהו השני של הנגד לשני השקעים השליליים בשני המיקרוולטמטרים; את המיקרוולטמטרים מציבים בשני צדי רביעיית הנגדים. עתה, על ידי הזזת הגררה על פני הריאוסטט המשמש כפוטנציומטר, מעלים בקצב קבוע עד כמה שאפשר את עוצמת הזרם בסלילים מאפס ל-2A במשך זמן של 2s, בקירוב. כתוצאה מהשינוי הליניארי של הזרם בסלילים, משתנה כמוֹבן באופן ליניארי גם השטף המגנטי דרך המעגל וסביבתו, ובמעגל נוצר כא"מ מושרה המזרים זרמים מושרים דרך כל אחד מארבעת הנגדים (תרשים א4').

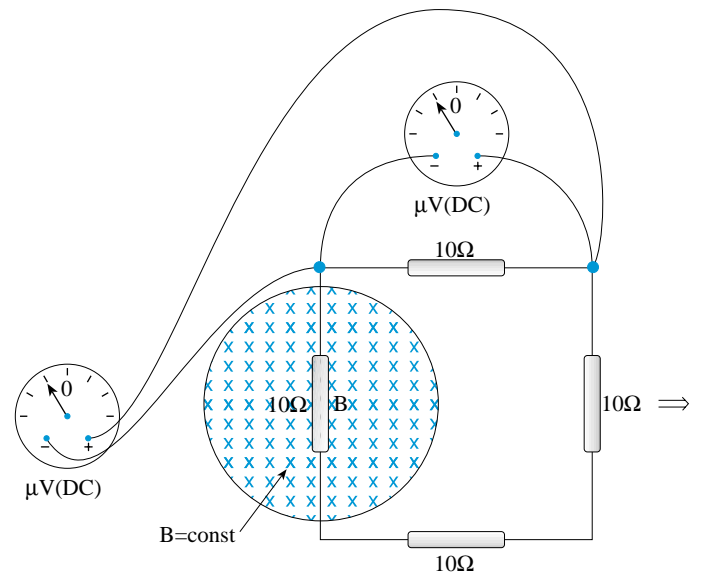
ממשיכים להיות מחוברים לאותן שתי נקודות במעגל - **תרשים ג3**). ניתן להסיק מכך שהכא"מ המושרה "התנועתי" אשר נוצר במעגל של ארבעת הנגדים גורם להפרדת מטענים במעגל, כלומר יוצר בו שדה חשמלי "אלקטרוסטטי", כך שבין כל שתיים מנקודותיו קיים הפרש פוטנציאלים (מתח חשמלי) אותו מודד כל אחד משני המיקרוולטמטרים.



תרשים ב3: תרשים סכימטי של הניסוי המוצג בתרשים א3 כאשר המיקרוולטמטרים נמצאים **משני צדי הנגד והשדה המגנטי של הסלילים**.

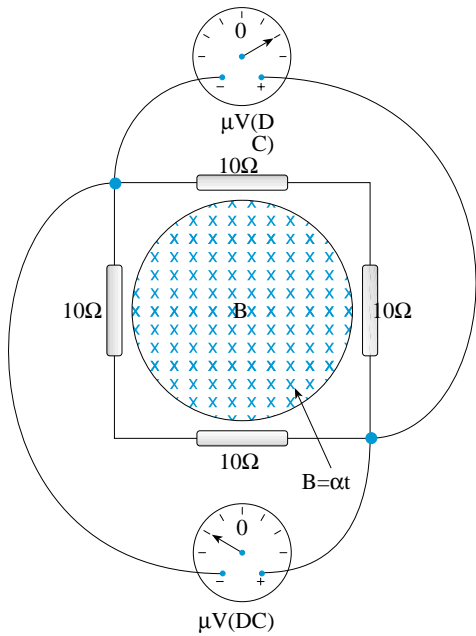


תרשים א4: תצלום המערכת כאשר משנים את השדה המגנטי עם הזמן. שני המיקרוולטמטרים מחוברים במקביל לשני קצות אחד הנגדים ומוצבים באופן לא סימטרי. סטיות המחוגים **שונות בגודלן והפוכות במגמתן**.



תרשים ג3: תיאור סכימטי של הניסוי המוצג בתרשים א3, אלא הפעם המיקרוולטמטרים נמצאים **מצדו האחד של הנגד והשדה המגנטי של הסלילים**.

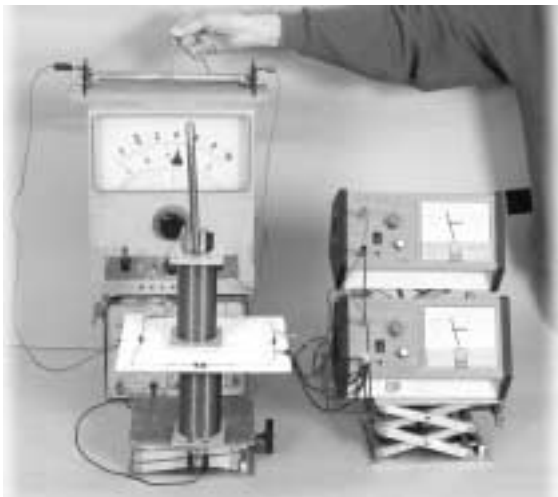
הפעם, שלא כמו בניסוי הראשון, סטיות המחווגים בשני המיקרוולטמטרים המחברים במקביל לשני קצות אחד הנגדים (שהם גם הקצוות של שלישיית יתר הנגדים), אינן שוות לא בגודלן ואף לא בכיוונן. (תרשים ב'4).



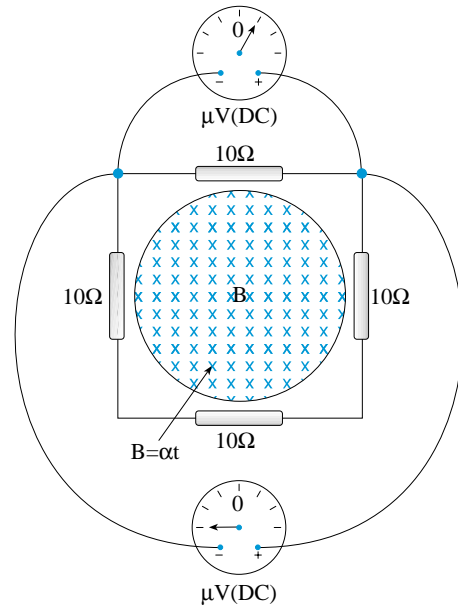
תרשים 5: תיאור סכימטי של מערכת הניסוי המוצג בתרשים 5.

2. שלב שני של הניסוי

מבלי לשנות את נקודות החיבור עם רביעיית הנגדים, מעבירים את אחד המיקרוולטמטרים ממקומו בצד האחד של רביעיית הנגדים לצד השני שלה - כלומר מציבים אותו בקרבת המיקרוולטמטר השני. במצב זה, כאשר חוזרים ומעלים את הזרם בסלילים, רואים כי סטיות מחוגי המיקרוולטמטר שוות כל הזמן בגודלן ובכיוונן. (תרשימים 6א, 6ב), עובדה שאיננה משתנה גם כאשר משנים את הנקודות ברביעיית הנגדים שאליהן מחברים את המיקרוולטמטרים.

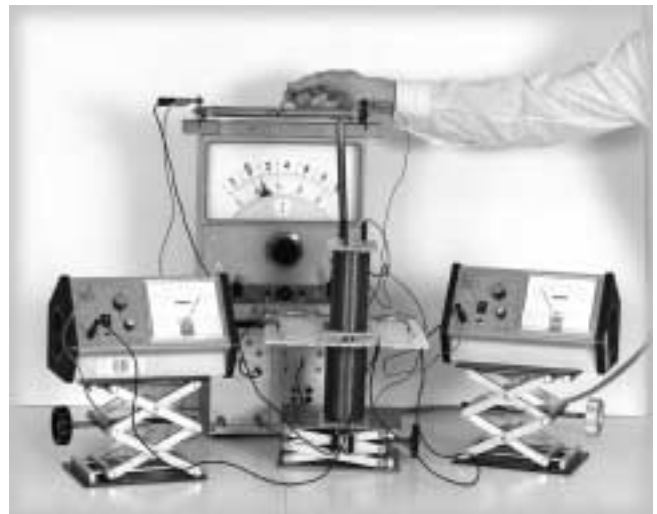


תרשים 6: תצלום המערכת כאשר המיקרוולטמטרים מוצבים זה ליד זה ללא שינוי נקודות החיבור. סטיות מחוגי המיקרוולטמטרים שוות בגודלן ובכיוונן.

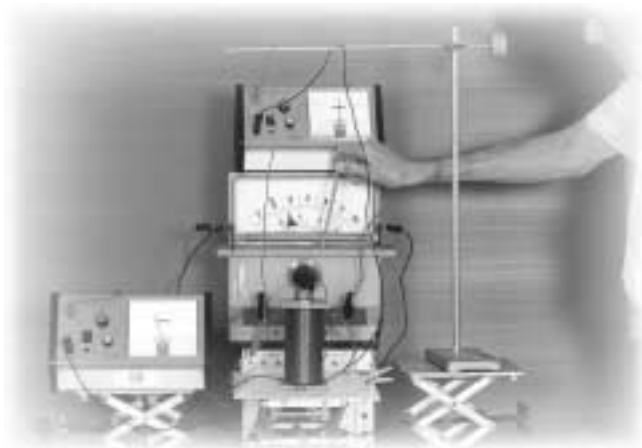


תרשים 4: תרשים סכימטי של מערכת הניסוי המוצג בתרשים 4.

לעומת זאת, אם מחברים את שני המיקרוולטמטרים לרביעיית הנגדים באופן סימטרי, כלומר אם מחברים כל אחד מהם לקצוות של שני נגדים מהרביעייה ומשאירים אותם מוצבים במקומם בשני צדי הרביעייה, נוכחים לדעת שסטיות מחוגיהם עדיין הפוכות בכיוונן, אולם הפעם הן שוות בגודלן. (תרשימים 5א, 5ב).



תרשים 4: מערכת דומה לזו שבתרשים 4. המיקרוולטמטרים מוצבים באופן סימטרי. סטיות המחווגים שוות בגודלן והפוכות במגמתן.

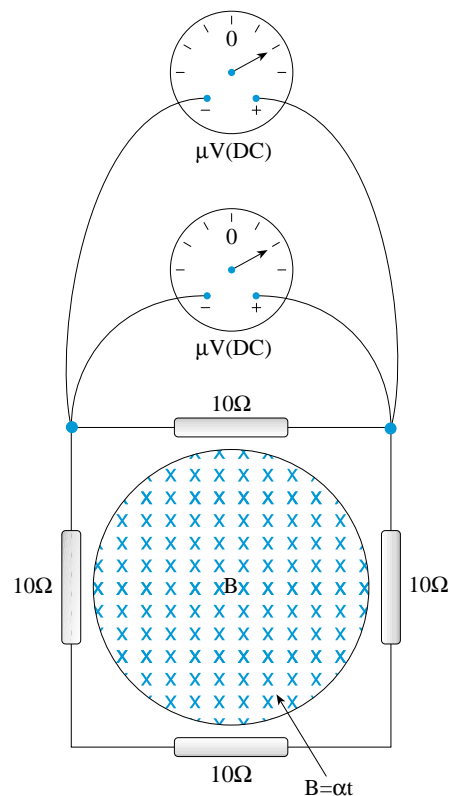


תרשים 7: חיבורי המיקרוולטמטרים כמו בניסויים הקודמים, אולם אחד מהם מוצב מעל המערכת כאשר התילים שלו מקבילים בקירוב לשדה המגנטי. סטיית מחוגו היא אפס, ואילו סטיית מחוגו של השני שונה מאפס.

באופן ישיר את השדות החשמליים הרוטציוניים שנוצרו בניסויים אשר הודגמו בפניהם. מלימודיהם הקודמים, התלמידים אמורים כמובן להכיר את השיטה הפשוטה שבה מגלים ומודדים שדות חשמליים אלקטרוסטטים (כוונתנו לשימוש בכדורי בוחן קטנים, כמקובל בהדגמות ובניסויים באלקטרוסטטיקה המבוצעים במעבדות של בתי הספר התיכוניים³). כדי להשיב על שאלתנו, על התלמידים לבצע הערכה ואחר כך השוואה של סדרי הגודל של עוצמות השדות החשמליים האלקטרוסטטיים שהכירו בעבודותיהם במעבדה החשמליים הרוטציוניים שנוצרו בניסויים שהדגמנו (מסתבר $E_{rot} \approx 10^{-4} \text{V/m}$, כפי שיתברר לנו מהמשך דברינו). מסתבר אפוא שקיים פער עצום של שמונה עד תשעה סדרי גודל בין העוצמות של השדות החשמליים הרוטציוניים ובין העוצמות של השדות החשמליים האלקטרוסטטים, לכן לא ניתן למדוד את השדות החשמליים הרוטציוניים בעזרת כדורי הבוחן המוכרים לתלמידינו מלימודי האלקטרוסטטיקה. כדי להמחיש בכל זאת את קיומם של השדות הרוטציוניים דרושה אם כן גישה אחרת - אותה ננסה להציג באמצעות הניסוי השלישי אותו נתאר להלן.

ג. ניסוי שלישי

בניסוי זה ניתקנו וסילקנו מהמערכת שלנו את רביעיית הנגדים, ואת זוג הסלילים, המחברים למקור המתח המשתנה (ספק D.C. עם חיבור פוטנציומטרי), הקפנו בלולאה סגורה של תילים מוליכים שחוברו לשני המיקרוולטמטרים אשר שימשו הפעם כנואמפרמטרים (תרשימים 8א', 8ב').



תרשים 8ב: תיאור סכימטי של מערכת הניסוי המוצג בתרשים 8א.

מתבקשת אפוא המסקנה שבניסוי זה הוראות שני המיקרוולטמטרים תלויות במיקומם ובמיקום התילים המחברים אותם לנקודות הנבדקות יחסית לרביעיית הנגדים. ביתר דיוק, הוראות המיקרוולטמטרים תלויות במיקומם יחסית לשדה המגנטי המשתנה עם הזמן, שרביעיית הנגדים מצויה בתוכו.

אפשר, ואולי אפילו רצוי, להוסיף ולהדגים עובדה חשובה זו גם על ידי הצבת אחד המיקרוולטמטרים מעל שני הסלילים, כך שכאשר מזרימים בסלילים זרם חשמלי, התילים המחברים מיקרוולטמטר זה עם שתי נקודות המגע שלהם עם רביעיית הנגדים יהיו מקבילים בקירוב לקווי השדה המגנטי בתוך הסלילים (המיקרוולטמטר השני יישאר במקומו, בצד רביעיית הנגדים). עתה, אם נשנה (נגדיל או נקטין) את עוצמת הזרם בסלילים, מחוג המיקרוולטמטר הניצב מעליהם לא יסטה כמעט ממצב האפס שלו. אולם במיקרוולטמטר הניצב במקומו הרגיל - על המישור שעליו מונחת רביעיית הנגדים, תיווצר סטיה ניכרת של המחוג (תרשים 7).

בשלב זה כדאי לשאול את התלמידים האם לדעתם הצידוד הפיסיקלי המצוי בבית ספרם יאפשר להם לגלות ולמדוד

שלב ראשון: הגדלנו את עוצמת הזרם בסלילים בקצב אחיד של $0.5A/s$, וכתוצאה מכך הראו שני הנואמפרמטרים כי בלולאה זרם זָרם מושרה שעוצמתו $30nA$ בקירוב.

שלב שני: הפעם הגדלנו את עצמת הזרם בסלילים בקצב של $1A/s$ בקירוב, ושני הנואמפרמטרים הראו שבלולאה זרם זָרם מושרה של $60nA$ בקירוב.

שלב שלישי: עקבנו אחרי מחוגי הנואמפרמטרים כאשר **הקטנו** את עוצמת הזרם בסלילים בקצב של $1A/s$. שני הנואמפרמטרים הראו שבלולאה זרם זָרם מושרה של $60nA$ בקירוב, אלא שכיוונו הפעם היה הפוך מכיוונו בשלבים הראשון והשני של הניסוי.

על פי תוצאות כל אחד משלבים אלה של ניסוינו ניתן לחשב בקירוב את עוצמתו של השדה החשמלי הרוטציוני שנוצר עקב שינויי השדה המגנטי של הסלילים.

נתוני המערכת, תוצאות המדידות, החישובים והמסקנות הזרם המושרה I' בלולאה שלנו מקיים את הקשר $I' = \epsilon / 2R$, כאשר R היא ההתנגדות של כל אחד משני הנואמפרמטרים ו- ϵ הוא הכא"מ המושרה בלולאה:

$$\epsilon = \oint \vec{E}_{rot} \cdot d\vec{r} = \left| \frac{d\phi_B}{dt} \right|$$

לגבי השטף המגנטי ϕ_B דרך הלולאה אפשר לרשום כי בקירוב טוב מתקיים: $\phi_B = BA = k_m \mu_0 \frac{N}{l} IA$, כאשר N הוא מספר כריכות התיל של כל סליל, l הוא האורך של כל אחד משני הסלילים, A הוא שטח החתך של מוט הברזל שהוכנס לתוך הסלילים (כי בשטח חתך זה היה מצוי רובו של השטף המגנטי שעבר דרך הלולאה שלנו), ו- k_m היא הפרמיאביליות ("החדירות") היחסית של חומר המוט, אותה מצאנו על ידי השוואה בין עוצמות השדה המגנטי של הסלילים עם המוט בתוכם וללא המוט. את עוצמות השדות המגנטיים מדדנו בעזרת גלאי Hall.

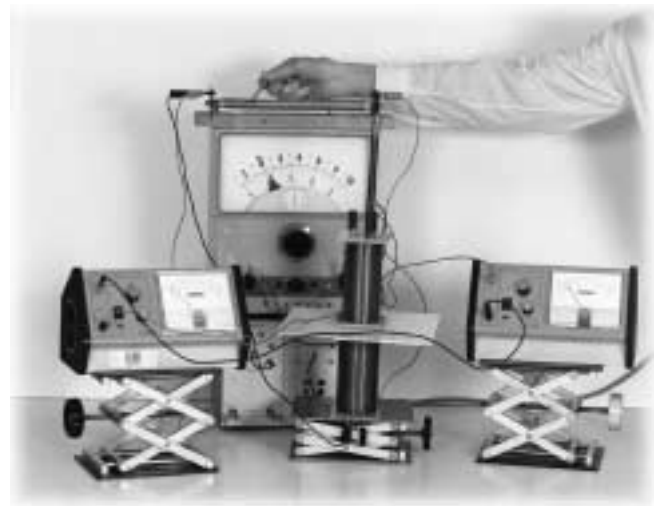
להלן נתוני המערכת שלנו והתוצאות של מדידותינו ושל חישובינו:

$$N = 500 ; l = 13cm = 0.13m ; A = \pi(10^{-2})^2 m^2 = \pi 10^{-4} m^2 ; \mu_0 = 4\pi 10^{-7} ; k_m \approx 100$$

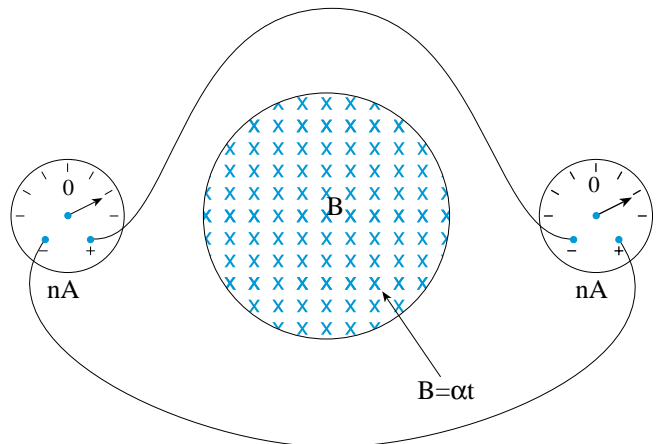
כמו כן נתון שההתנגדות של כל אחד מהנואמפרמטרים היא $R=10^3 \Omega$; לכן, כאשר קצב שינוי הזרם בסלילים הוא $dI/dt = 1A/s$, הכא"מ המושרה בלולאה אמור להיות:

$$\epsilon = k_m \mu_0 \frac{N}{l} A \frac{dI}{dt} \approx \frac{100 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 500 \cdot \pi \cdot 10^{-4} \cdot 1}{1.3 \cdot 10^{-1}} \approx 1.5 \cdot 10^{-4} V$$

לפיכך הזרם המושרה (I') בלולאה אמור להיות:



תרשים 8א: מסגרת הנגדים הוחלפה בתיל מוליך והמיקרוולטמטרים משמשים כנואמפרמטרים. ממדידה זו ניתן לחשב את גודל השדה הרוטציוני.



תרשים 8ב: תיאור סכימטי של מערכת הניסוי המוצג בתרשים 8א

כאשר שינונו, כמו בניסוי השני, את עוצמת הזרם בסלילים בקצב אחיד - מדד כל אחד מהנואמפרמטרים את עוצמת הזרם המושרה בלולאה. זרם מושרה זה מצביע כמובן על קיומו של שדה חשמלי רוטציוני (\vec{E}_{rot}) בתחום שבו מצויה הלולאה, ומאפשר להעריך בעזרת חישוב פשוט את סדר הגודל של עוצמת שדה זה. להלן תיאור מפורט יותר של השינויים שביצענו במערכת ושל תוצאותיהם:

מראי מקום

1. פרקי חשמל ומגנטיות, חלק ב': פרקי מגנטיות, עמ' 104-101, מהדורת ניסוי, המחלקה להוראת המדעים, מכון ויצמן למדע, 1998.
 2. בגנו, א., אלון, ב., גניאל, א., מעוף - שדה ופוטנציאל - ארגון מושגים, חוברת 5, עמ' 9, מהדורת עיצוב, המחלקה להוראת המדעים, מכון ויצמן למדע, 1995.
 - הערה: ניסוי זה מתואר גם בעמ' 169 של מהדורת הניסוי של החוברת מעוף, המחלקה להוראת המדעים, מכון ויצמן למדע, 1999.
 3. פרקי חשמל ומגנטיות, פעילויות, חלק א' - פרקי חשמל, עמ' 37-42, מהדורת ניסוי, המחלקה להוראת המדעים, מכון ויצמן למדע, 1998.
- הערה: הספרים המוזכרים ב-1 וב-3 הם פרי העבודה של צוות הפיתוח: בת שבע אלון, אסתר בגנו, צבי גלר, אורי גניאל, קורנה פולינגר, שלמה רוזנפלד ומיקי רוני.
4. Reif, F., Generalized Ohm's law, potential difference and voltage measurements, Am. J. Phys. **50** (12), pp. 1048-1049, 1982.
 5. Romer, R. H., What do "voltmeters" measure? Faraday's law in a multiply connected region, Am. J. Phys., **50** (12), pp. 1089-1093, 1982.
 6. Lanzara, E. and Zangara, R., Potential difference measurements in the presence of a varying magnetic field, Phys. Ed., **30**(2), pp. 85 - 89, 1995.

לקריאה נוספת

1. כהן ר., על כא"מ, הפרש פוטנציאלים ומתח, גליונות 1(3), עמ' 10-12, אלול, תשלי"ב (1972).
2. Goldberg, D. and Zik, O., Topologically dependent voltage measurement, Physics Education, **26**(4), pp. 256-257, 1991.

תהודה

$$I' = \frac{\epsilon}{2R} \approx \frac{1.5 \cdot 10^{-4}}{2 \cdot 10^3} \approx 75 \text{ nA}$$

נוכחנו לדעת שכאשר קצב שינוי הזרם בסלילים היה 1 A/s , הזרם המושרה בלולאה היה 60 nA , כלומר על אף אי דיוקים מסוימים בחלק ממדידותינו קיימת התאמה טובה מאוד בין הניבוי שלנו ובין תוצאות הניסויים שביצענו. עתה, אם נסתמך על הערך המדוד I' של הזרם המושרה בלולאה שלנו (אשר הקיפה את זוג הסלילים), ועל הקשר בין הכא"מ המושרה ϵ ובין השדה החשמלי הרוטציוני (האמור להיות בעל סימטריה גלילית סביב הסלילים), נוכל לטעון כי:

$$\epsilon = I' \cdot 2R = E_{\text{rot}}(r) \cdot 2\pi r$$

כאשר r מייצג רדיוס של לולאה מעגלית המקיפה את זוג הסלילים, ו- E_{rot} מייצג את עוצמת השדה החשמלי המושרה. מכיוון שמצאנו כי $\epsilon = 1.5 \cdot 10^{-4} \text{ V}$, והלולאה שלנו היתה בעלת רדיוס ממוצע $r \sim 20 \text{ cm} = 0.2 \text{ m}$, מסתבר שעוצמת השדה החשמלי הרוטציוני שנוצר בניסויים שלנו הייתה:

$$|E_{\text{rot}}| \approx \frac{\epsilon}{2\pi r} \approx \frac{1.5 \cdot 10^{-4}}{2\pi \cdot 2 \cdot 10^{-1}} \approx 10^{-4} \text{ V}$$

בכך ביססנו את טענתנו שלא ניתן למדוד שדה זה (או שדות רוטציוניים דומים) באמצעות כדורי בוחן. לבסוף, אחרי שבניסוינו הראינו כי שדה מגנטי המשתנה עם הזמן יוצר שדה חשמלי רוטציוני שהוא שדה שאיננו משמר, מתעוררת השאלה מה מודדים שני המיקרוולטמטרים המחוברים במקביל לקצות הנגדים ברביעיית הנגדים - כמתואר בניסוינו השני. זוהי שאלה חשובה שנדונה בכמה מאמרים שפורסמו בספרות המקצועית הלוועזית^{4,5,6}. אנו ננסה להתייחס לשאלה זו במאמר אחר שנפרסם בעתיד בעתוננו.

אנו משתתפים באבלו של חברנו

ד"ר אלי רז

במות עליו רעיתו הדס ז"ל

מערכת "תהודה"

מרכז המורים הארצי לפיסיקה

וקבוצת הפיזיקה במחלקה להוראת המדעים

ועדת המקצוע בפיסיקה והפיקוח על הוראת הפיסיקה