

ניסויים בהשראה אלקטרומגנטית בעזרת סלילי הלמהולץ

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

כשמלמדים פרקי אלקטרוסטטיקה, מטפלים הרבה בשדות חשמליים אחידים המצויים בין לוחות מקבילים של קבלי לוחות, הרחק מקצות הלוחות. באותה המידה מן הראוי לטפל בשדות מגנטיים אחידים, כשמלמדים פרקי אלקטרומגנטיות. השדות המגנטיים בהם עורכים ניסויים בבית הספר התיכון הם בדרך כלל שדות של מגנטי מוט, של מגנטי פרסה ושל זרמים חשמליים בתיילים ישרים או מעגליים. שדות אלה רחוקים מלהיות אחידים. שדה מגנטי אחיד קיים כידוע בסילונית ארוכה בה זורם זרם חשמלי קבוע; אולם מכיוון שהגישה לחלק הפנימי של הסילונית קשה, רבים מעדיפים לבסס את הטענה בדבר אחידות השדה המגנטי בתוכה על הוכחה תיאורטית, ולא על ביצוע ניסויים. הניסוי היחיד שמבצעים בשדה המגנטי האחיד של סילונית הוא מדידתו בעזרת מאזני זרם, וחקירת תלותו בעוצמת הזרם. סלילי הלמהולץ מוכרים למורי הפיזיקה ולתלמידיהם בעיקר מהניסויים היפים לקביעת היחס e/m של האלקטרון. בתחום בין סלילי הלמהולץ בהם זורם זרם חשמלי קבוע, קיים שדה מגנטי שהוא בקירוב טוב שדה אחיד, ומכיוון שהגישה לתחום נוחה יחסית, אפשר להשתמש בו לביצוע ניסויים מתאימים. במאמר זה אתאר כמה ניסויים כאלה. תחילה רצוי להדגים בשיטה פשוטה ובעזרת מכשיר המוכר היטב לתלמידים (המצפן) כי השדה המגנטי בתחום שבין סלילי הלמהולץ הוא אמנם שדה מגנטי אחיד.

ניסוי 1: בדיקת השדה המגנטי בתחום שבין סלילי הלמהולץ בעזרת מצפן.

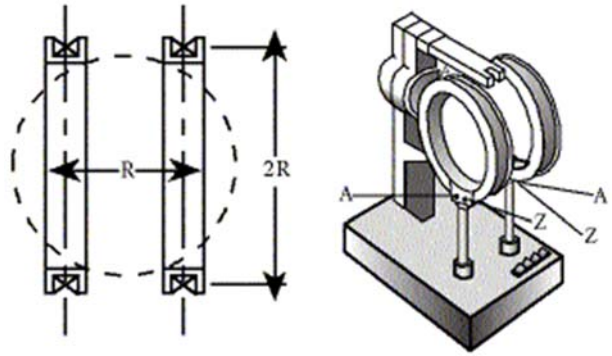
ניסוי 2: הדגמות של השראה אלקטרומגנטית בעזרת סלילי הלמהולץ

ניסוי 3: מדידת הכא"מ המושרה □ במוליך ישר שאורכו e , הנע במהירות v במאונך לשדה מגנטי אחיד שעוצמתו B (או - אישור ניסוי של הנוסחה: $Bev = \square$).

ניסוי 4: דיסקת פאראדיי (Faraday)

ניסוי 1: בדיקת השדה המגנטי בתחום שבין סלילי הלמהולץ בעזרת מצפן. חזרה לתחילת המאמר

שני סלילי הלמהולץ המוצבים על הכן המיוחד המיועד לכך (תרשים 1), מחוברים באמצעות פוטנציומטר למקור מתח נמוך. סידור זה מאפשר להזרים בסלילים זרם חשמלי חלש I (כמה מיליאמפרים), כך שעוצמת השדה האלקטרומגנטי האחיד בין הסלילים, B_I , תהיה מסדר גודל של עוצמת הרכיב האופקי B_H של השדה המגנטי הארצי.

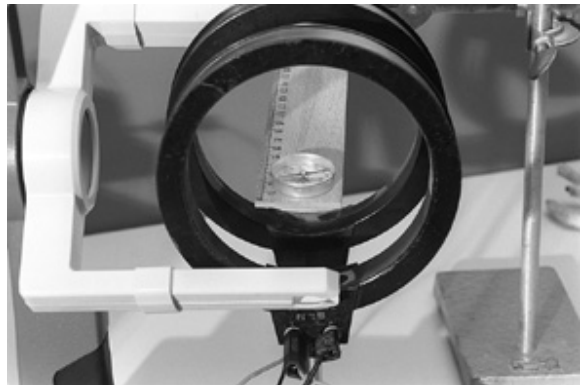


תרשים 1

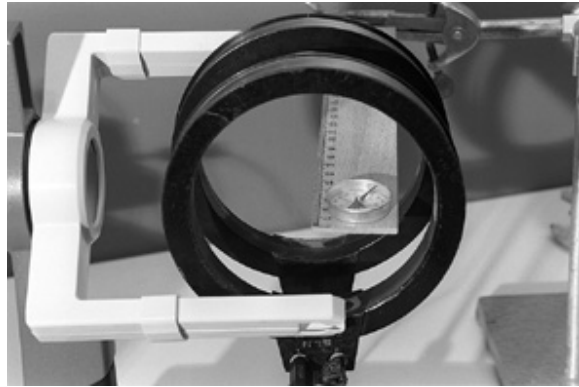
סלילי הלמהולץ

שלבי הביצוע

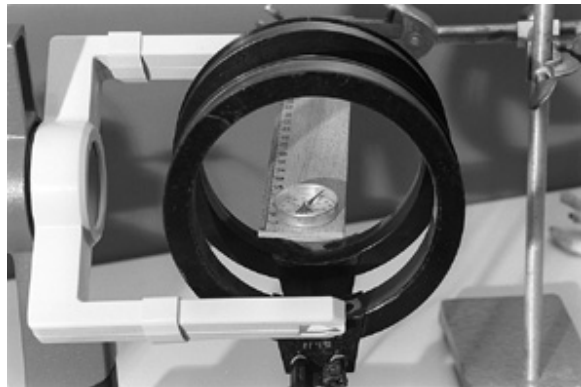
א. מעמידים את הכן עם סלילי הלמהולץ הרחק ככל האפשר מעצמים המכילים ברזל (כמו הספק המשמש כמקור מתח), וממכשירים שיש בהם מגנטים (כגון מיליאמפרמטר אנאלוגי). במרכז התחום שבין הסלילים מציבים מצפן (כשהוא מונח בצורה אופקית על גבי סרגל עץ או פלסטיק המחובר לסטטיב), ובעזרתו מכוונים את המערכת כך שמישורי הסלילים יהיו בכיוון צפון - דרום (תרשים 2).



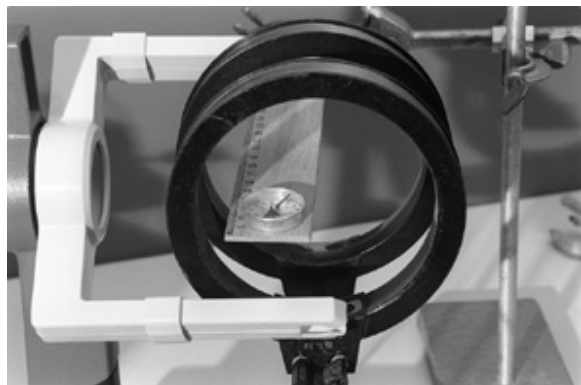
תרשים 2: הצבה נכונה של סלילי הלמהולץ בעזרת מצפן.



תרשים א'



תרשים ב'



תרשים ג'

תרשים 3 : בדיקת אחידות השדה המגנטי של סלילי הלמהולץ באמצעות מצפן

ב. מזיזים את הסרגל עם המצפן המונח עליו ימינה ושמאלה, מעלה ומטה, כך שהמצפן יימצא בנקודות רבות ושונות בין הסלילים; אם בכל הנקודות האלה מחט המצפן ממשיכה להצביע בכיוונים צפון-דרום, ניתן להסיק מכך שבאזור הנבדק פועל אך ורק השדה המגנטי האחד של כדור הארץ.

ג. חוזרים ומציבים את המצפן במרכז התחום שבין הסלילים ומזרימים דרכם זרם חשמלי כזה שמחט המצפן תסטה בזווית של 45° מכיוון צפון-דרום (משמע שהשדה

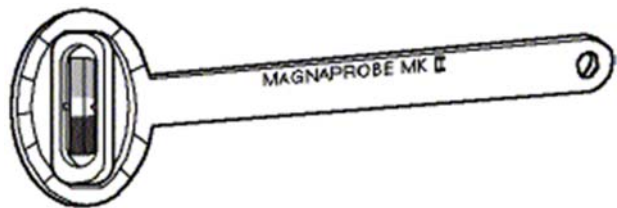
האלקטרומגנטי של הזרם בסלילים מאונך לרכיב האופקי של השדה המגנטי הארצי ושווה לו בעוצמתו).

עתה, מבלי לשנות את מיקום הסלילים ואת הזרם דרכם, מעבירים את המצפן ממקום למקום בתחום שבין הסלילים. מן העובדה שזווית הסטייה מן הצפון של מחט המצפן אינה משתנה עקב כך, אנו למדים שהשדה

המגנטי בתחום זה הוא אכן שדה אחיד (תרשים 3 א-ג).

ד. מעבירים את המצפן גם לאזורים בקירבת הסלילים מחוץ לתחום שביניהם, ונוכחים לדעת שקיימים אזורים בהם השדה המגנטי של הסלילים איננו אחיד, ומקבלים מושג על קווי השדה המגנטי באזורים אלה.

ה. המחשה מרחבית טובה של קווי השדה המגנטי בתחום שבסביבת סלילי הלמהולץ אפשר לקבל בעזרת "magnaprobe" - מחט מגנטית קטנה הנתמכת על ידי מערכת צירים ומיסבי כדורים המאפשרים לה להסתובב באופן חופשי במרחב. בכל נקודה שבה השדה המגנטי של הסלילים חזק בהרבה מן השדה המגנטי הארצי, המחט תסתדר לאורך קווי השדה המגנטי של הסלילים באותה נקודה (תרשים 4).



תרשים 4

magnaprobe - מכשיר להמחשה מרחבית של קווי שדה מגנטי

אחרי שמשתכנעים שהשדה המגנטי שבין סלילי הלמהולץ הוא שדה אחיד, אפשר להשתמש בו כדי להכיר ולחקור תופעות מגנטיות שונות, ביניהן השראה אלקטרומגנטית ואפקט Hall.

ניסוי 2: הדגמות של השראה אלקטרומגנטית בעזרת סלילי הלמהולץ [חזרה לתחילת המאמר](#)

המערכת

א. מנתקים את הסלילים מהכך שלהם, ובעזרת סטיב ואוחזים מציבים אותם זה מעל זה בצורה אופקית, כך ששטחי הסלילים חופפים, והמרחק ביניהם שווה לרדיוס של כל אחד מהם. בין הסלילים קיים חיבור מוליך, כנדרש כדי שזרם חשמלי קבוע הזורם דרכם ייצור שדה מגנטי אחיד ביניהם.

ב. מחברים את הסלילים באמצעות פוטנציומטר למקור מתח ישר, שמתחו המירבי V30 בקירוב. עוצמת הזרם המירבית שמותר להזרים דרך סלילי הלמהולץ מהסוג בו השתמשנו היא A2.

ג. מסגרת של תייל מוליך שצורתה ואורך בסיסה 4 ס"מ מחוברת בתיילים מוליכים ארוכים למיקרו-וולטמטר שתפקידו למדוד את הכא"מ המושרה במעגל המסגרת. הכא"מ המושרה הנמדד הוא בתחום $\pm 100 \mu V$; יש לאפס את המיקרו-וולטמטר לפני כל מדידה.

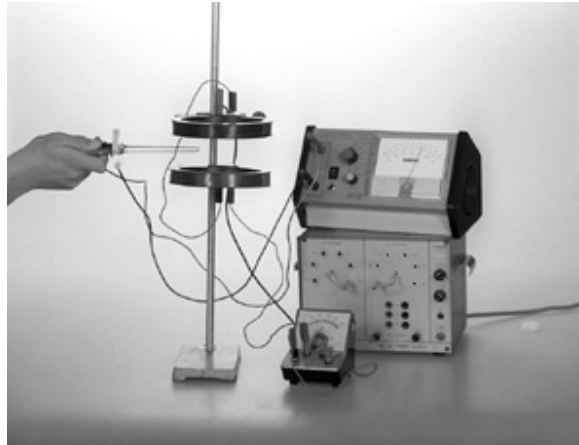
שלבי הביצוע והתוצאות

א. בין סלילי הלמהולץ בהם עדיין לא זורם זרם, מחזיקים את מסגרת התייל המוליך המחוברת להדקי המיקרו-וולטמטר במקביל לסלילים. כאשר מפעילים את מקור המתח, זרם חשמלי (בעל עוצמה של A1 בערך) מתחיל לזרום בסלילים, רואים סטייה רגעית מסויימת של מחוג המיקרו-וולטמטר, החוזר מייד לאחר מכן למצב האפס שלו. כאשר מפסיקים את פעולת מקור המתח, והזרם בסלילים מתאפס, רואים שוב סטייה רגעית של המחוג, אלא שהפעם הסטייה היא בכיוון ההפוך.

ב. מחזיקים את מסגרת התייל המחוברת למיקרו-וולטמטר כך ששטחה מאונך לשטחי שני הסלילים; מפעילים את מקור המתח ולאחר זמן מה מפסיקים את פעולתו. הפעם סטייות מחוג המיקרו-וולטמטר ממצב האמצע שלו זעירות ביותר, כלומר שבניסוי זה לא נוצר (כמעט) כא"מ מושרה במעגל של מסגרת התייל.

ג. חוזרים על הניסויים הנ"ל כאשר בין מישור מסגרת התייל לבין המישורים של הסלילים קיימות זוויות שונות, בין 0° – 90° , ומגלים שהכא"מ המושרה במעגל המסגרת גדל (או קטן) כשהשינויים בשטף המגנטי דרך מעגל המסגרת גדלים (או קטנים). אישור נוסף לעובדה חשובה זו מקבלים אם משנים את מתח המקור, (ועל ידי כך את הזרם דרך הסלילים, זאת אומרת את השדה המגנטי ביניהם), וגם אם מחליפים את מסגרת התיל שאורך בסיסה 4 ס"מ במסגרות תיל אחרות, שאורך בסיסן קטן או גדול יותר (ועל ידי כך משנים את שטח מעגל המסגרת ששינויי השטף דרכו יוצרים את הכא"מ המושרה). בשלבים א' וג' של הניסוי, הכא"מ המושרה במעגל מסגרת התייל נוצר עקב שינוי בזמן של השדה המגנטי דרכו. בשלבי הניסוי הבאים נבדוק היווצרות של כא"מ מושרה כתוצאה מתנועת מוליכים בשדה המגנטי האחד.

ד. מסגרת תייל מוליך המחוברת למיקרו-וולטמטר שהופעל בתחום רגישותו המירבית מוחזקת בין הסלילים כך שקווי השדה האחד של הסלילים מאונכים לשטח המסגרת (תרשים 5).



תרשים 5: תנועת מסגרת התייל במאונך לשדה המגנטי האחיד:

כשמניעים את המסגרת בתוך השדה האחיד במאונך לו קדימה ואחורה, נוצרות סטייות ניכרות של מחוג המיקרו-וולטמטר תחילה בכיוון אחד, ואחר כך בכיוון הנגדי. תנועה זו של המסגרת בשדה המגנטי האחיד גורמת להיווצרות כא"מ מושרה המחליף את סימנו עם החלפת כיוון התנועה של המסגרת. אם מגבירים את מהירות התנועה של המסגרת קדימה ואחורה, או אם מגדילים את עוצמת השדה המגנטי בין הסלילים על ידי הגדלת הזרם דרכם, גדלות סטייות מחוג המיקרו-וולטמטר ממצבו ההתחלתי, כלומר גדלה ההשראה האלקטרומגנטית במעגל המסגרת. לעומת זאת, אם מניעים את מסגרת התייל בתוך השדה המגנטי האחיד ימינה ושמאלה (אך תוך הקפדה לא לצאת מהתחום בו השדה הוא אחיד), אין כמעט סטייות של מחוג המיקרו-וולטמטר, כלומר לא נוצר כמעט כא"מ מושרה במסגרת הנעה. תוצאה דומה לזו האחרונה מתקבלת כאשר מניעים את מסגרת התייל במקביל לעצמה בכיוונים מעלה ומטה.

ה. ניסויים דומים לאלה שבוצעו בשלב ד' אפשר לבצע עם מסגרת של תייל מוליך שמישורה מקביל לקווי השדה. התוצאות המתקבלות מניסויים אלה, יחד עם תוצאות הניסויים של השלב הקודם, יכולות לשמש בסיס עובדתי רחב להבנת תופעות ההשראה האלקטרומגנטית הנובעות מתנועת מוליכים בשדות מגנטיים.

כדי להדגים תופעות של השראה אלקטרומגנטית אין

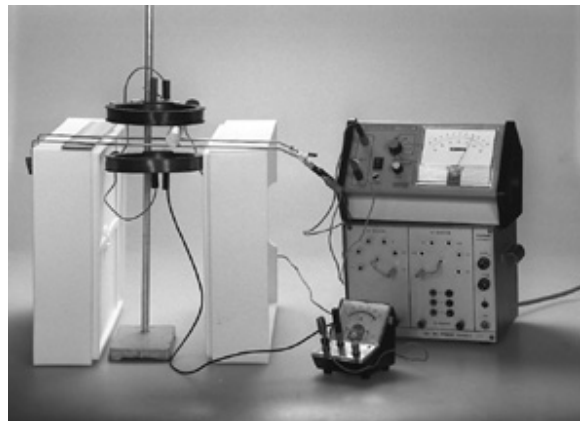
כמובן הכרח לבצע את הניסויים בשדה מגנטי אחיד; קיימים ניסויים פשוטים רבים בהם מודגמות תופעות אלה בשדות מגנטיים שאינם אחידים (ראה "ניסויי הדגמה אחדים בהוראת הנושא השראה אלקטרומגנטית", חלק א' וחלק ב' - חיים ברוקר ז"ל, תהודה (3) 9 ותהודה (1) 10). ניסויים אלה, וגם הניסויים המופיעים תחת הכותרת "ניסוי 2" במאמר זה, הם ניסויים איכותיים בעיקרם, זאת אומרת אין בהם חקירה כמותית של הכא"מ המושרה בפרמטרים בהם הוא תלוי. נתאר עתה ניסוי בו ניתן להשתמש בשדה המגנטי האחיד של סלילי הלמהולץ כדי לבצע חקירה כזאת.

ניסוי 3: מדידת הכא"מ המושרה ϵ במוליך ישר שאורכו v במאונך לשדה מגנטי אחיד שעוצמתו B (או - אישור ניסוי של הנוסחה: $Bev = \epsilon$). [חזרה לתחילת המאמר](#)

המערכת

א. בין שני סלילי הלמהולץ אופקיים המוחזקים על ידי סטאטיב כמו בניסוי 2, מצויים שני מוטות מוליכים, ישרים ומקבילים העשויים מחומר שאינו פרומגנטי (פליז או אלומיניום הם חומרים מתאימים). המוטות, שאורך כל אחד מהם גדול בערך פי שניים מהקוטר של סליל הלמהולץ, נתמכים בקצותיהם על ידי שתי תיבות שוות גובה העשויות מחומר שאיננו מוליך (בניסוי שלנו, המתואר בתרשים 6, השתמשנו בשתי מגירות פלסטיק, מהסוג המצוי כמעט בכל מעבדה). המרחק בין המוטות המקבילים לא צריך להיות גדול מהקוטר הפנימי של כל אחד מהסלילים, כך שגליל מפליז או מאלומיניום שגובהו גדול במקצת מהקוטר הפנימי שלהסלילים יוכל להתגלגל בחופשיות לאורך המוטות שישמשו לו כמסילה.

ב. לביצוע הניסוי מחברים את הסלילים באמצעות פוטנציומטר למקור מתח מתאים (כמו בניסוי 2), ומחברים קצה אחד של כל אחד מהמוטות באמצעות תנין ותייל ארוך להדקי המיקרו-וולטמטר (תרשים 6).



תרשים 6: מערכת "גליל מתגלגל" בשדה מגנטי אחיד על מסילה ישרה

שלבי ביצוע ותוצאות

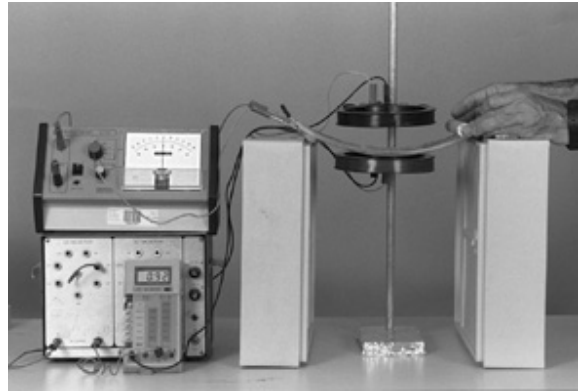
א. מפעילים את מקור המתח כך שיזרום זרם קבוע של A_1 דרך הסלילים. מפעילים את המיקרו-וולטמטר בתחומו הרגיש ביותר, ובדחיפה קלה גורמים לגליל להתגלגל במהירות קבועה בקירוב לאורך המוטות המשמשים לו כמסילה. רושמים מהו המירווח d בין המוטות המקבילים שהוא גם האורך האפקטיבי e של המוליך הנע, ומהו הכא"מ המושרה ε הנוצר כתוצאה מתנועת הגליל. חוזרים על הניסוי מספר פעמים כשבכל פעם משנים את המירווח בין המוטות. אם מצליחים, אחרי אימון קל, להקנות בכל פעם לגליל בערך את אותה המהירות, יכולים לבדוק את תלות הכא"מ המושרה ε באורך המוליך e .

ב. באופן דומה, כאשר שומרים על מירווח קבוע בין מוטות המסילה (e קבוע), יכולים על ידי שינוי מבוקר בזרם I דרך הסלילים להיווכח שהכא"מ המושרה ε פרופורציוני לעוצמת השדה המגנטי B .

ג. קשה קצת יותר לבדוק באופן כמותי את תלות הכא"מ המושרה ε במהירות v של הגליל המתגלגל. שיטה אחת לשיחזור יותר נוח, ולשינוי יותר מבוקר של מהירויות הגליל הוא להגביה במקצת, במידה ידועה, את הצד האחד של המסילה. ידיעת מידת ההגבהה h (סדר גודל של מילימטרים אחדים) מאפשרת לחשב בדיוק סביר מהי המהירות v של הגליל שהתגלגל וירד לאורכה.

ד. שיטה שניה, אולי נוחה ומשכנעת יותר, היא להחליף את המסילה הישרה במסילה שצורתה קשת של מעגל, זאת אומרת מסילה הבנויה משני מוטות מוליכים כפופים שכל אחד מהם הוא קשת של מעגל שרדיוסו r (תרשים 7).

אם משחררים בכל פעם את הגליל באותה הנקודה על פני המסילה המעגלית, הוא יגיע לנקודה הנמוכה ביותר, שהיא גם נקודת האמצע של התחום בין שני הסלילים, באותה המהירות.



תרשים 7: מערכת "גליל מתגלגל" על מסילה מוליכה עגולה

יתר על כן, על פי מיקום נקודת השחרור של הגליל על פני המסילה ועל פי אורך רדיוסה, אפשר לחשב את מהירות הגליל בנקודה הנמוכה ביותר של המסילה.

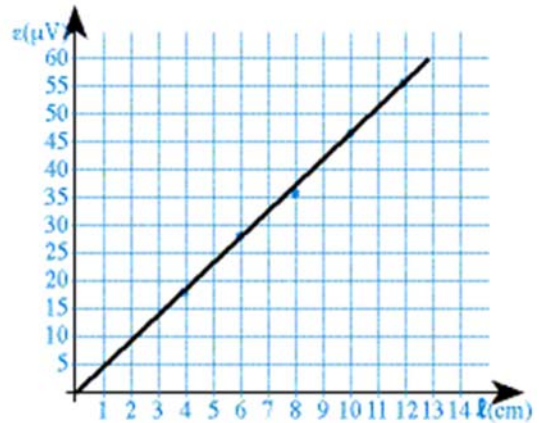
ה. להלן כמה מתוצאות המדידות שקיבלנו בניסויים שערכנו בשתי השיטות הנ"ל:

1. גליל האלומיניום התגלגל לאורך מסילה הבנויה משני מוטות ישרים, כשהקצה האחד של המסילה הוגבה יחסית לקצה השני ב- $h = 0.4 \text{ cm}$; דרך סלילי הלמהולץ הוזרם זרם של $I = 0.9 \text{ A}$ (טבלה 1).

e (cm) האורך האפקטיבי של הגליל	4	6	8	10	12
ϵ (μV) הכא"מ המושרה שנמדד	18	28	36	47	56

טבלה 1

הגרף המתאר תוצאות אלה (תרשים 8) מראה בבירור כי הכא"מ ϵ המושרה במוליך הנע בשדה מגנטי פרופורציוני לאורך המוליך e : $\epsilon \propto e$



תרשים 8

הגרף של ϵ כפונקציה של l

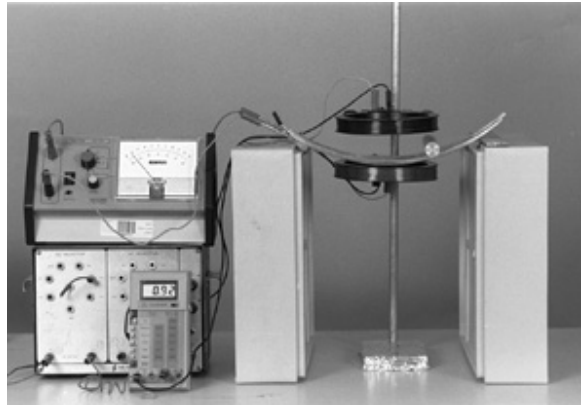
במדידה נוספת הוכפל הזרם דרך סלילי הלמהולץ

($I=1.8\text{A}$) ונמדד הכא"מ המושרה ϵ כשהאורך האפקטיבי של הגליל היה $e' = 8\text{cm}$. התוצאה שנתקבלה ($\epsilon' = 74\mu\text{V}$) מתאימה בגבולות הדייקוק של ניסוינו לקביעה שהכא"מ המושרה פרופורציוני לשדה המגנטי B ; $\epsilon \propto B$.

השפעת ההגדלה של מהירות המוליך על הכא"מ המושרה בו נבדקה על ידי הגבהה נוספת של המסילה. בניסוי זה אומנם לא בוצעו מדידות מדויקות, אבל התוצאות המקורבות שהתקבלו התאימו יפה לצפייות.

2. בסידרת ניסויים אחרת שיחררנו את גליל האלומיניום מספר פעמים בנקודה מסויימת על פני מסילה מעגלית מוליכה שנמצאה בשדה המגנטי האחד שבין סלילי הלמהולץ (ראה תרשים 9). התנודות המחזוריות (בקירוב) של הגליל על פני המסילה בתוך השדה המגנטי האחד יצרו בו כא"מ מושרה שהשתנה באופן מחזורי עם הזמן - בגודלו וגם בכיוונו; למעשה נוצר בגליל המתגלגל-מתנודד מה שבדרך כלל קרוי "מתח חילופין".

שינוי המרחק בין שני המוטות המוליכים הכפופים בצורת קשתות מעגליות (המוטות מהווים את "המסילה המוליכה"), ושינוי עוצמת הזרם בסלילי הלמהולץ משנים בהתאמה את האורך האפקטיבי e של המוליך (הגליל המתגלגל), ואת עוצמת השדה המגנטי B שבתוכו הוא נע. תוצאות ארבעת



תרשים 9: הכא"מ המושרה בגליל הנע על מסילה עגולה.

הניסויים שביצענו מסוכמות בטבלה 2, וניתן להסיק מהן

שהכא"מ המושרה בגליל המתגלגל פרופורציוני לאורכו האפקטיבי e ולעוצמת השדה המגנטי שבו הוא נע, B .

8 4 e (cm)

(I(A

65 μ V 30 μ V 0.9 A

120 μ V 60 μ V 1.8 A

טבלה 2: הכא"מ המושרה בגליל המתגלגל

הערה: בטבלה 2 רשומים הזרמים I שהוזרמו בסלילים ולא השדות המגנטיים B שנוצרו על ידי זרמים אלה. הקשר בין הזרם בסלילי הלמהולץ לבין השדה המגנטי B שהזרם I יוצר נתון על ידי $B = kI$,

$$k \approx 4.23 \cdot 10^{-3} \frac{T}{A}$$

כאשר k הוא קבוע פרופורציה התלוי במערכת במקרה שלנו.

אם חוזרים ומשחררים בכל פעם את הגליל בנקודה גבוהה יותר על פני המסילה, נוכחים לדעת שהכא"מ המושרה בו גדול בהתאם. מסיבות טכניות לא ביצענו חקירה **כמותית** של תלות הכא"מ המושרה בגליל בגובה נקודת השיחרור שלו על פני המסילה. כאמור, הסתפקנו בקביעת העובדה שככל שהגליל יורד מגובה רב יותר, מהירותו בנקודה הנמוכה ביותר של המסילה גדולה יותר, ועל כן הכא"מ המושרה בו גדול יותר.

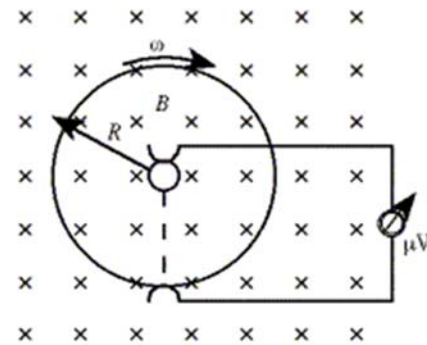
ניסוי 4: דיסקת פאראדיי (Faraday) חזרה לתחילת המאמר

ניסוי קצת יותר מסובך, המדגים השראה אלקטרומגנטית, והמאפשר למדוד את תלות הכא"מ המושרה בפרמטרים בהם הוא תלוי, הוא הניסוי בדיסקת מתכת (אנחנו השתמשנו בדיסקת אלומיניום) הסובבת במהירות זוויתית קבועה בתוך שדה מגנטי אחיד, כמו זה המצוי בין סלילי הלמהולץ. מכיוון שניסוי דומה בוצע לראשונה כבר בשנת 1831 על ידי פאראדיי (שלא השתמש כמובן בסלילי הלמהולץ, כי אלה "הומצאו" והוכנסו לשימוש בתאריך מאוחר יותר), הוא נקרא על שמו "ניסוי הדיסקה של פאראדיי" או "מחולל הדיסקה של פאראדיי"^{5,4}.

כאשר דיסקת מתכת בעלת רדיוס R שמישורה מאונך לשדה מגנטי אחיד B, סובבת במהירות זוויתית קבועה ω , נוצר כא"מ מושרה ε בין ציר הדיסקה ובין הנקודות על היקפה; גודלו של הכא"מ המושרה נתון על ידי הביטוי:

$$\varepsilon = \frac{1}{2} \omega B R^2$$

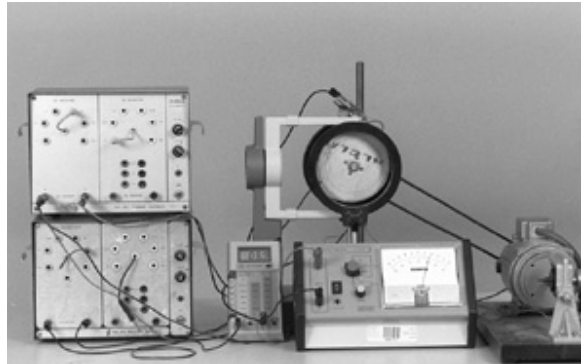
מודדים את הכא"מ המושרה בעזרת מברשות פחם או מגעים מחליקים הנוגעים האחד בנקודות שעל היקף הדיסקה, והשני בצירה, והמחוברים בתילים מוליכים למד מתח רגיש - מיקרו-וולטמטר (ראה תרשים 10).



תרשים 10

תרשים 10: הכא"מ המושרה ב"דיסקת פאראדיי"

רדיוס הדיסקה R ידוע או ניתן בקלות למדידה; את עוצמת השדה המגנטי B של הסלילים קל לחשב לפי הזרם I הזורם בהם, כך שנשארת רק בעיית המדידה של תדירות הסיבוב f של הדיסקה, ($\omega = 2\pi f$). אם לא ידועה תדירות הסיבוב של המנוע המסובב את הדיסקה, אפשר להשתמש במקור אור סטרובוסקופי מכויל כדי למדוד אותה. ביצענו את הניסוי באמצעים פשוטים למדי (ראה תרשים 11), ואף על פי כן קיבלנו תוצאות המניחות בהחלט את הדעת. עם זאת, חשוב לציין כי ביחס לתיאוריה של ניסוי זה קיימות כמה בעייות מעניינות שלא נוכל לדון בהן במסגרת מאמר זה, ואשר ראוי אולי להקדיש להן מאמר נפרד ומיוחד.



תרשים 11: מערכת "דיסקת פאראדיי" בה נערכו ניסוינו

מראי מקום

1. זינגר, דוד: -פיסיקה, לקט ניסויים, עמ' 69 - 72, המחלקה להוראת המדעים, מכון ויצמן למדע, 1994.
2. רוזן, עדי: "מדידת היחס e/m של אלקטרון", תהודה 17 (1), עמ' 40 - 45, 1995.
3. בגנו, א., אלון, ב. וגניאל, א.: פיסיקה, מעוף: שדה ופוטנציאל, יחידה 5, עמ' 21 - 22, המחלקה להוראת המדעים, מכון ויצמן למדע, 1994.
4. Feynman, R.P., Leighton, R.B. and Sands, M.: The Feynman Lectures on Physics, Vol. II pp. 17-2, 17-3, Addison-Wesley Publishing Company Inc., Reading, MA., 1966.
5. מאירוביץ, חגי: חוק השטף של Faraday, גליונות (תהודה), 1, (3), עמ' 18 - 20, המחלקה להוראת המדעים, מכון ויצמן למדע, 1972.