
תנועת אלקטרונים בשדה מגנטי

מטרות המעבדה

לחקור תנועת אלקטרונים בשדות מגנטיים שונים, להעריך את היחס e/m .

ספרות עזר

- Mechanics, Berkeley Physics Course, Vol. 1, Chapter 3, p.77.
- Electricity and Magnetism, Berkeley Physics Course, Vol.2, Chapter 6, P. 201-203
- Physics, R. Resnick & D. Halliday, Part 2, Chapter 34

מכשור

אוסצילוסקופ אנלוגי עם שפופרת 150UTM31, שני ספקי מתח עד 50V, שני מולטימטרים, שני סלילים, תילים צבעוניים, כבל קואקסיאלי.

תנועת אלקטרון בשדה מגנטי – רקע תיאורטי

כאשר אלקטרון שמסתו m ומטענו $-e$ נע בשדה מגנטי B , פועל עליו כוח לורנץ:

$$\vec{F} = m\vec{\dot{v}} = -e \cdot \vec{v} \times \vec{B} \quad (1)$$

בגלל שהכוח ניצב למהירות, רכיב המהירות בכיוון השדה אינו משתנה, והתנועה במישור הניצב לשדה היא מעגלית. נצטט את הפתרון של משוואת התנועה (1) כפי שמופיע ב – Vol.1,

Berkeley, עמוד 77 עבור שדה B קבוע בכיוון \hat{z} אזי:

$$v_x = -v_1 \sin \omega t \quad (2)$$

$$v_y = v_1 \cos \omega t$$

$$v_z = \text{const}$$

כאן כיוון \hat{y} הוא הכיוון של המהירות ההתחלתית בזמן $t=0$, וגודל המהירות ההתחלתית הוא v_1 . הסימן ב- v_x הוא שלילי בגלל שמטען האלקטרון הוא שלילי. ביחידות MKS, התדירות היא:

$$\omega = eB/m \quad (3)$$

הפתרון של ההעתק הוא:

$$x = x_0 - (v_1/\omega)(1 - \cos\omega t) \quad (4)$$

$$y = y_0 + (v_1/\omega)\sin\omega t$$

$$z = z_0 + v_z t$$

אנו נחקור את התנועה בשני מקרים. בניסוי (6.1) נבדוק את המקרה $v_z=0$, ואז התנועה היא מעגלית; ובניסוי (6.2) נבדוק את המקרה $v_z \neq 0$, ואז התנועה היא הלית (helical). בפרק הזה נקבע את המערכת הצירים כך שציר Z תמיד בכיוון השדה המגנטי \vec{B} .

רקע לניסוי 1 – מהירות התחלתית ניצבת לשדה B ($v_z = 0$)

בחלק הזה של הניסוי, המתואר בציור 1, שמים שני סלילים משני צדי השק"ק, כך שצירים המשותף (ציר Z) ניצב לציר השפופרת. במשוואות (2) ו-(4), הגדרנו את ציר y ככיוון המהירות ההתחלתית. מכאן יוצא שציר השק"ק הוא ציר y . לכן מישור המרקע הוא מישור $x-z$. הגיאומטריה הזו מתוארת בציור 1.א. בציור 1.ב. רואים חתך הניצב לציר השדה המגנטי, כלומר, מישור $x-y$. במישור הזה מתרחשת תנועת האלקטרון. כדי לחשב את תנועת האלקטרון, ניקח מודל פשוט, שבו השדה B קבוע בפנים העיגול (המסמן את חתך הסליל) ומתאפס מחוץ לעיגול. בזמן $t=0$, אלקטרון מגיע לראשית הצירים עם מהירות V_1 בכיוון y . מרחק המרקע מראשית הצירים הוא b . השדה המגנטי גורם להסחת האלקטרון, וגודל ההסחה הוא a (ראה ציור 1.ב.).

לפי תנאי ההתחלה של המערכת, $x_0 = y_0 = z_0 = 0$ ו- $v_z = 0$. אם נציב ערכים אלה במשוואות (4) נקבל את מסלול האלקטרון.

$$x = -(v_1/\omega)(1 - \cos\omega t) \quad (5)$$

$$y = (v_1/\omega)\sin\omega t$$

$$z = 0$$

ניתן לראות בקלות ששתי המשוואות הראשונות מקיימות:

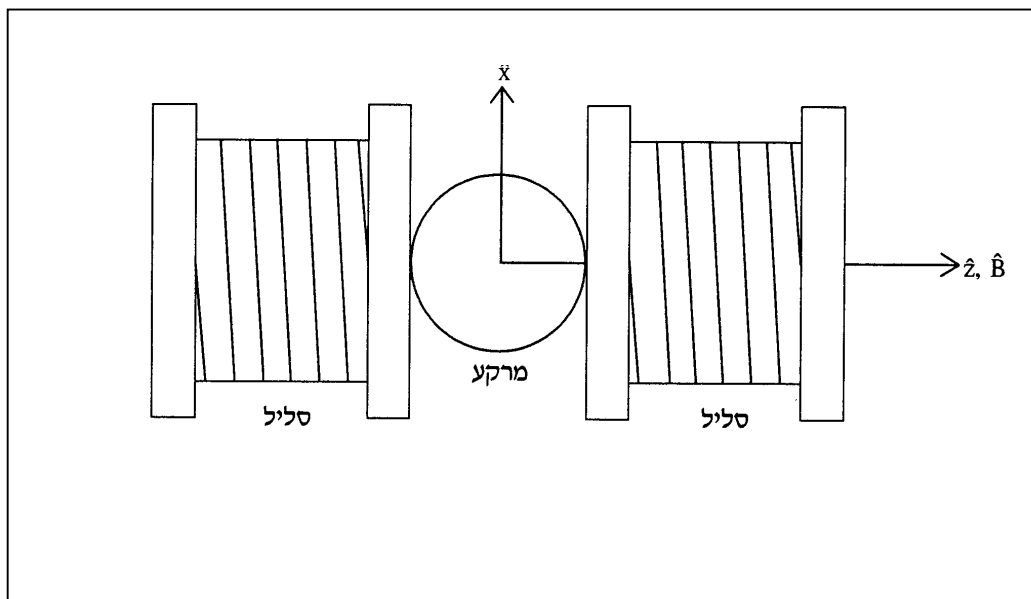
$$[x + (v_1/\omega)]^2 + y^2 = (v_1/\omega)^2 \quad (6)$$

זאת משוואה של מעגל שרדיוסו (v_1/ω) ושמוקדו בנקודת $y = 0$, $x = -(v_1/\omega)$.

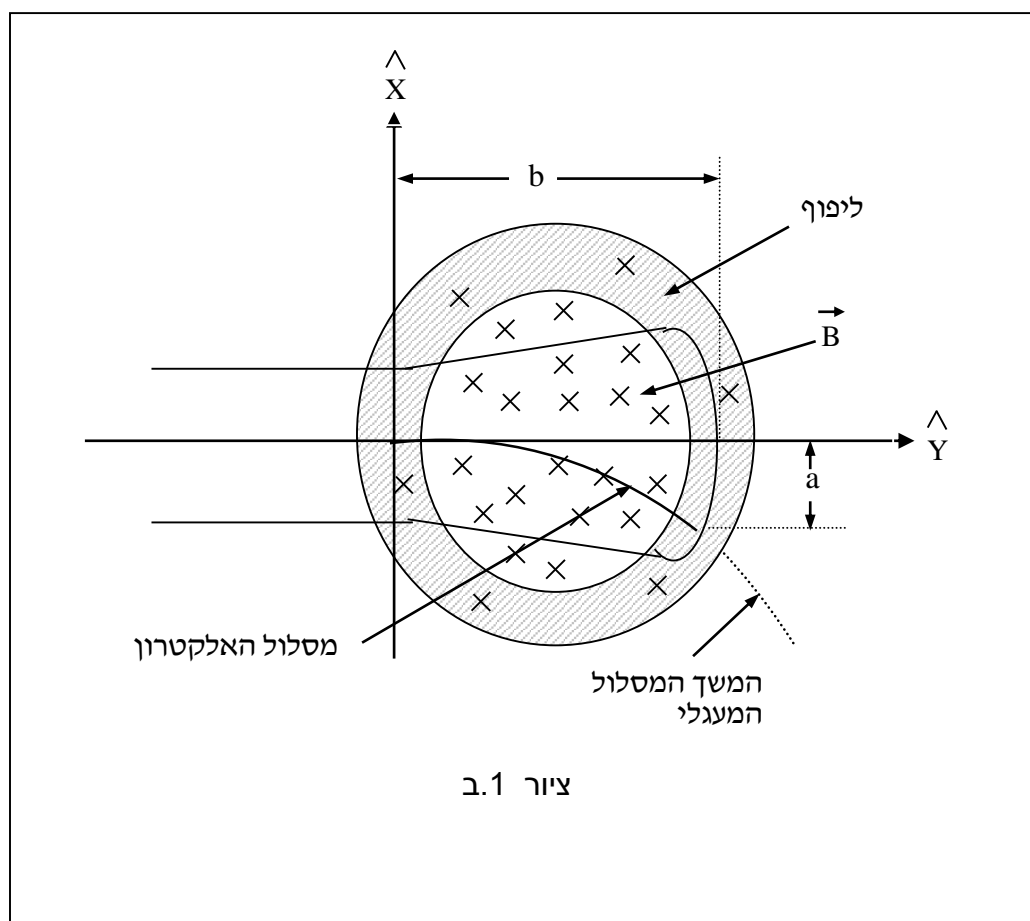
כדי למצוא את ההסחה, נציב $(x, y) = (a, b)$ במשוואה (6). כשנחליף את a נקבל:

$$a = -(v_1/\omega) + \sqrt{(v_1/\omega)^2 - b^2} \quad (7)$$

בתנאי המעבדה, $b^2 \ll (v_1/\omega)^2$ (ראו שאלת הכנה 2), ולכן אפשר להשתמש בקירוב :



ציור 1.א



ציור 1. תנועת אלקטרונים בשדה מגנטי הניצב למהירות

$$\sqrt{(v_1/\omega)^2 - b^2} \approx \frac{v_1}{\omega} - \frac{b^2\omega}{2v_1} \quad (8)$$

אם נציב את (8) ב- (7) נקבל

$$a = -\frac{1}{2}b^2\omega/v_1 \quad (9)$$

המהירות v_z היא המהירות שהאלקטרון השיג ע"י האצה בפוטנציאל V_A (מתח ההאצה של תותח האלקטרונים) ולכן $\frac{1}{2}mv_z^2 = eV_A$. אם מציבים את זה ב- (9) ביחד עם $\omega = eB/m$ נקבל:

$$a = -\frac{1}{2} \sqrt{\frac{e}{m}} \cdot \frac{B}{\sqrt{2V_A}} \cdot b^2 \quad (10)$$

המשוואה הזו מראה לנו כי מניסוי זה ניתן למדוד את היחס של מטען האלקטרון למסתו, (e/m) . למעשה נוכל רק להעריך יחס זה כי החישוב של ההסחה הסתמך על ההנחה ש- B הוא קבוע באזור השפעתו ומתאפס מחוץ לאזור. הנחה זו אינה נכונה – היא קירוב בלבד.

רקע לניסוי 2 – מהירות התחלתית שאינה ניצבת לשדה B (תנועה הלית)

בניסוי זה מלבישים סליל מסביב לשק"ק, כך שציר הסליל מתלכד עם ציר השפופרת, ומפעילים מתח הסחה V_d על זוג לוחות אחד. תנועת האלקטרונים מתוארת בציר 2. אלקטרון שמהירותו v_z בכיוון \hat{z} עובר בין לוחות ההסחה הגורמים לרכיב מהירות v_1 בכיוון \hat{y} . אחר כך האלקטרון נכנס לשדה מגנטי \vec{B} בכיוון \hat{z} הגורם לתנועה מעגלית במישור $x-y$. המהירות בכיוון \hat{z} אינה משתנה. התוצאה של התנועה המשולבת היא שהאלקטרון נע על מעטפת של גליל בצורה סלילית. מסלול זה נקרא הליקס (helix). כדי לחשב את המסלול, נניח כי השדה המגנטי מתאפס עבור $Z < 0$, והוא קבוע עבור $Z > 0$. בזמן $t = 0$ האלקטרון מגיע לראשית הצירים (ראו ציור 2) עם מהירות $v_1\hat{y} + v_z\hat{z}$. כאשר מציבים תנאי התחלה אלה במשוואות (4) מקבלים:

$$x = -(v_1/\omega) (1 - \cos\omega t) \quad (11)$$

$$y = (v_1/\omega) \sin\omega t$$

$$z = v_z t$$

אפשר לחלץ את t משתי המשוואות הראשונות של (11) על ידי שימוש במשוואה השלישית: מציבים בהם $t = z/v_z$ ומקבלים:

$$x = -(v_1/\omega) [1 - \cos(\omega z/v_z)] \quad (11')$$

$$y = (v_1/\omega) \sin(\omega z/v_z)$$

ממשוואות אלה רואים כי ההיטלים של התנועה במישורים $x-z$ ו- $y-z$ הם סינוסואידלים. הטלים אלו מתוארים בציר 2. במישור $x-y$ היטל התנועה הוא מעגל.

המרקע נמצא במישור $z = L$. האלקטרונים יפגעו במרקע בנקודה (X, Y) . אפשר למצוא את קואורדינאטות הנקודה הזאת בעזרת משוואות (11'):

$$X = -(v_1/\omega)(1 - \cos 2\phi) \quad (12)$$

$$Y = (v_1/\omega) \sin 2\phi$$

$$\phi = \omega L / 2v_z \quad \text{כאשר-}$$

שימוש בזהויות טריגונומטריות נותן:

$$X = -L(v_1/v_z)\sin^2\phi/\phi \quad (13)$$

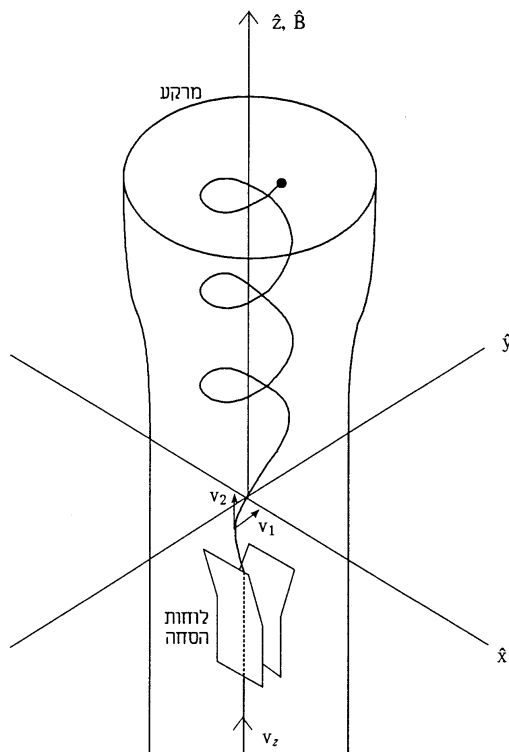
$$Y = L(v_1/v_z) \sin \phi \cos \phi / \phi$$

נמצא את המובן הגיאומטרי של ϕ על ידי חילוק X/Y :

$$X/Y = -\tan\phi \quad (14)$$

לכן, ϕ היא הזווית מציר y לרדיוס וקטור (X, Y) . זווית זאת מתוארת בציר 3. מדידה של הזווית ϕ מאפשרת לנו לחשב את היחס e/m . נשתמש בביטוי ל- v_z המתקבל מחוק שימור האנרגיה ($\frac{1}{2}mv_z^2 = eV_A$) ובביטוי לתדירות ($\omega = eB/m$) ונציב בהגדרה של ϕ במשוואה (12). נקבל:

$$\phi = \sqrt{\frac{e}{m}} \cdot L \cdot B / (2\sqrt{2V_A}) \quad (15)$$



ציור 2. תנועה הלית

לכן, אם משרטטים את ϕ כפונקציה של $B/\sqrt{V_A}$ אמורים לקבל קו ישר ולפי שיפועו ניתן לחשב את היחס e/m .

אנו נעקוב אחר נקודת האור במרקע בזמן שאנו משנים את B. מהי העקומה שנקודת האור מציירת? המשוואה הפרמטרית של הקו נתונה ב – (13). צורה נוחה יותר לכתיבה מתקבלת אם מגדירים כרגיל:

$$X = -r \sin \phi \quad r = (X^2 + Y^2)^{1/2}$$

$$Y = r \cos \phi$$

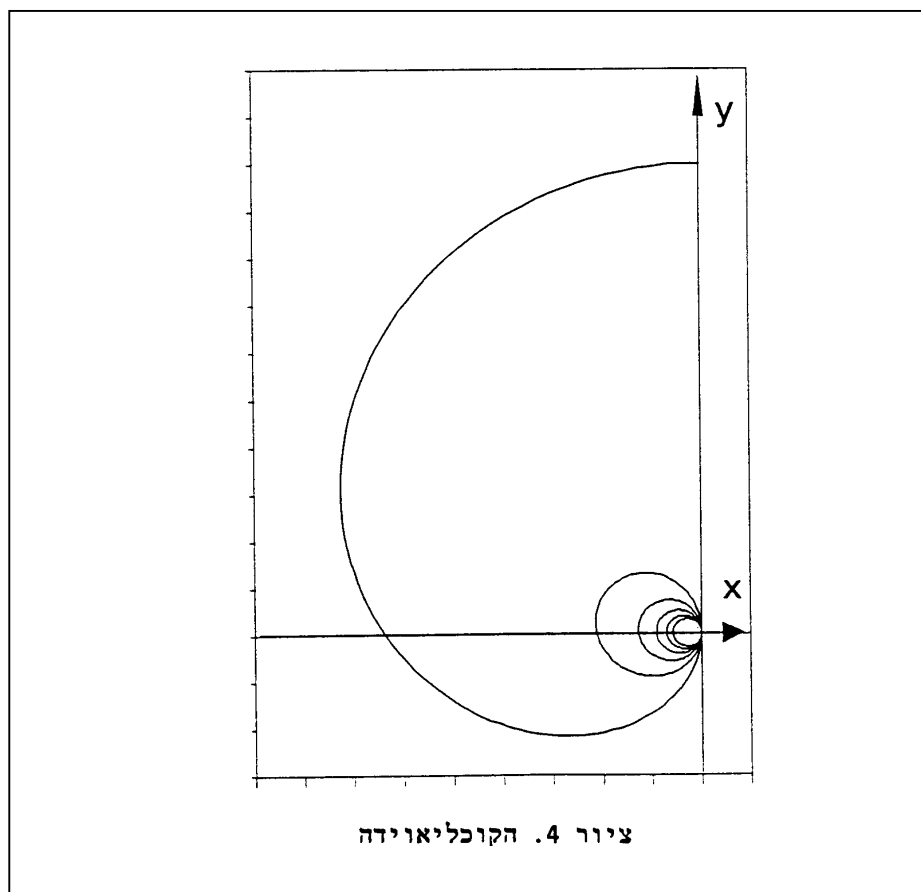
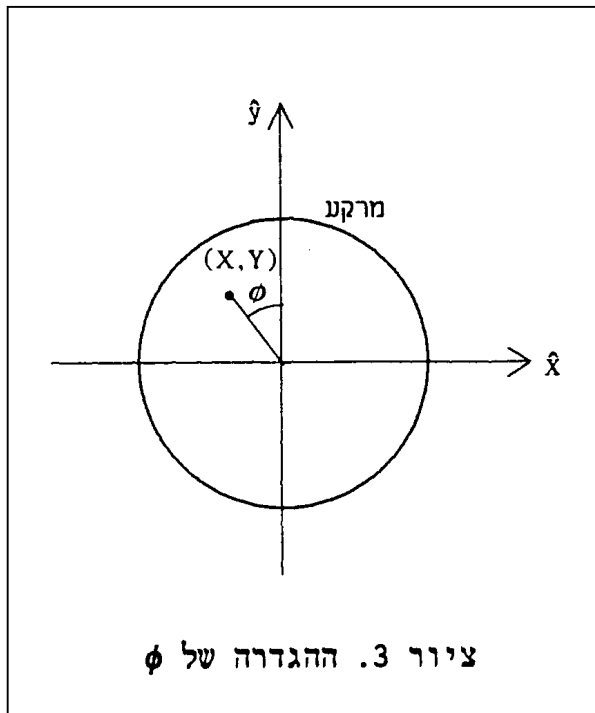
אז מוצאים כי משוואת הקו היא:

$$r = r_0 \sin \phi / \phi \quad (16)$$

כאשר $r_0 = L(v_1/v_2)$. משוואה (16)

היא משוואה של עקומה הנקראת קוכליאוידה (cochleoid).

עקומה זאת מתוארת בציור 4.



חישוב השדה המגנטי

אחת המטרות של ניסוי זה היא להעריך את e/m עבור האלקטרון. מצאנו שתי שיטות לעשות זאת. בניסוי 6.1 מצאנו (משוואה 10) שההסחה a היא פרופורציונאלית ל- $B/\sqrt{V_A}$, ומגורם הפרופורציה ניתן לחשב את e/m . בניסוי 6.2, מצאנו שהזווית של התנועה הלית פרופורציונית ל- $B/\sqrt{V_A}$ (משוואה 15) וגם כאן ניתן לחשב את e/m מגורם הפרופורציה.

כדי שנוכל להשתמש בשיטות אלה להעריך את e/m , נצטרך לדעת את ערכו של השדה המגנטי B . מכשירי המדידה במעבדה שלנו הם מולטימטרים, והם מסוגלים למדוד גדלים רבים, אך לא את הערך של השדה המגנטי. בהיעדר מכשיר מדידה לשדה מגנטי, נשאר לנו האפשרות לחשב אותו.

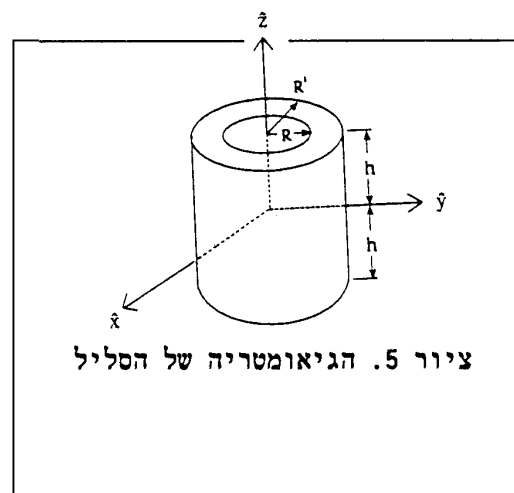
חישוב של שדה מגנטי הוא בדרך כלל לא מסובך ביותר, כי חוק Biot-Savart נותן ביטוי שהוא יחסית פשוט לחישוב. במקרה של סליל אפשר אפילו לבצע את האינטגרציה בחוק Biot-Savart באופן אנליטי עבור נקודות על ציר הסליל. חישוב זה נעשה ב- Berkeley, Vol.2, ע' 202 עבור סליל דק. במקרה שלנו – סליל עבה (ראו ציור 5) – דרושה עוד אינטגרציה אחת. התוצאה היא הבאה: אם Z הוא מרחק על הציר מן הראשית, אזי השדה המגנטי שם $B(Z)$ הוא:

$$B(z) = \mu_0 n i [F(h-z) + F(h+z)] / 2(R' - R) \quad (17)$$

$$F(x) = x \ln \{ [R' + (R'^2 + x^2)^{1/2}] / [R + (R^2 + x^2)^{1/2}] \} \quad \text{כאשר}$$

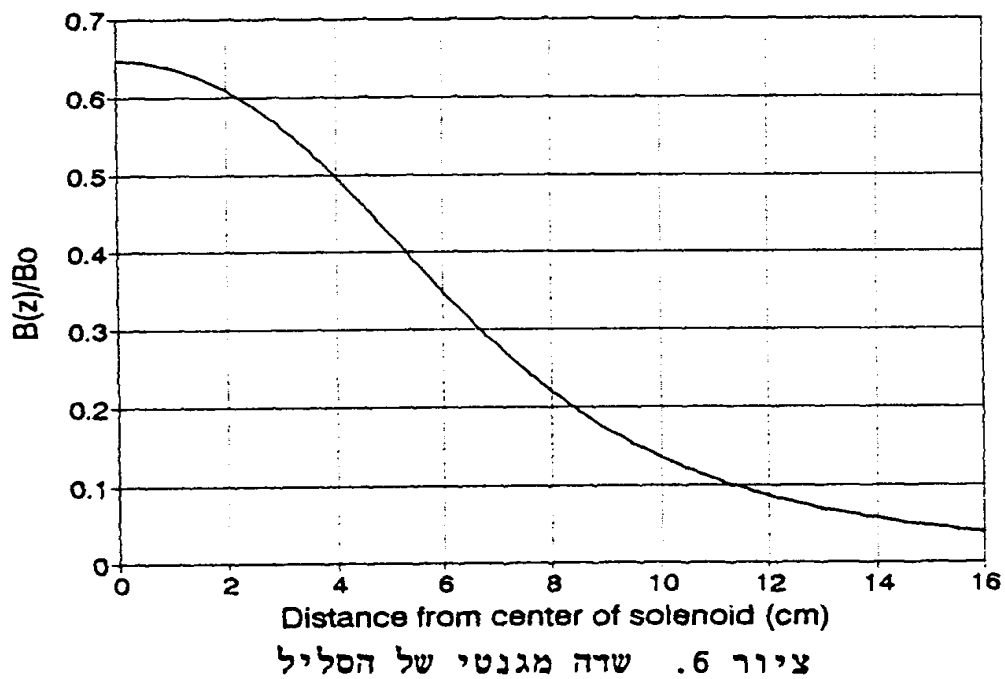
μ_0 הפרמאביליות של הריק, n מספר הליפופים ליחידת אורך, i הזרם, R ו- R' רדיוס הפנימי והחיצוני של הסליל בהתאמה, ו- $2h$ גובה הסליל (ראו ציור 5). הגדלים המתאימים במעבדה נתונים בטבלה 1.

גדלים של הסליל לניסוי 1	
μ_0	$4\pi \times 10^{-7}$ weber/amp-m
h	0.049 ± 0.002 m
R	0.049 ± 0.002 m
R'	0.067 ± 0.002 m
n	3250 m^{-1}



התוצאות של החישובים של השדה המגנטי נתונות בטבלה 2 ובאופן גרפי בציור 6.

טבלה 2. שדה מגנטי B(z) של סליל.					
Z = מרחק לאורך הציר ממרכז הסליל; $B_0 = \mu_0 n i$					
Z(cm)	B(z)/B ₀	Z(cm)	B(z)/B ₀	Z(cm)	B(z)/B ₀
0	0.654	6	0.347	11	0.107
1	0.637	7	0.278	12	0.086
2	0.608	8	0.219	13	0.069
3	0.561	9	0.172	14	0.056
4	0.496	10	0.135	15	0.046
5	0.422				



בניסוי 6.1 אנו נמדוד את ההסחה כפונקציה של הזרם בסליל. כדי שנוכל להשוות עם התיאוריה, נציב בתוך משוואה (10) ביטוי לשדה מגנטי כפונקציה של הזרם:

$$B = \mu_0 n i \quad (B/B_0) \quad (18)$$

נעריך את המנה (B/B_0) מטבלה 2 או מציור 6. משוואה (10) תקבל את הצורה

$$a = K_1 (i / \sqrt{V_A}) \quad (19)$$

כאשר K_1 הוא גורם פרופורציה, השווה ל –

$$K_1 = -\sqrt{(e/m)n\mu_0}(B/B_0)b^2/(2\sqrt{2}) \quad (19')$$

בניסוי 6.2 נמדוד את הזווית ϕ כפונקציה של הזרם. כדי להשוות לתיאוריה נציב במשוואה (15) את הביטוי (18), ונקבל:

$$\phi = K_2(i/\sqrt{V_A}) \quad (20)$$

כאשר K_2 הוא גורם פרופורציה, השווה ל –

$$K_2 = \sqrt{(e/m)n\mu_0}(B/B_0)L/(2\sqrt{2}) \quad (20')$$

מידת שני גורמי הפרופורציה K_1 ו- K_2 תיתן לנו אפשרות להעריך את (e/m) בשתי דרכים שונות.

שאלות הכנה

1. הניחו שהזרם העובר בסליל הוא $i = 10 \text{ mA}$. חשבו את המהירות הסיבובית $\omega = eB/m$ בשני המקרים הבאים:
 - א. הסידור הגיאומטרי כמו בציור 1. הניחו $z = 2h$ לכל סליל.
 - ב. הסליל מלופף סביב השפופרת (ציור 2). הניחו $z = 0$.
 היעזרו בטבלה 2 או בציור 6. השתמשו בגדלים הגיאומטריים של טבלה 1.
2. א. חישבו את v_1 כאשר $V_A = 2000 \text{ V}$. חשבו את האורך ה"טבעי" v_1/ω השתמשו בתוצאה של שאלה 1.א.
 - ב. בדקו את ההנחה $b^2 \ll (v_1/\omega)^2$. (ראו עמ' 83).
3. מודדים את התנועה ההלית של האלקטרון (חלק ב' של הניסוי). הניחו כי $V_A = 1500 \text{ V}$, $L = 100 \text{ mm}$, $i = 0.2 \text{ A}$. כמה סיבובים עושה האלקטרון לפני שהוא מגיע למרקע? כמה זמן דרוש לכל סיבוב?
4. איך אפשר לקבוע את הכיוון של השדה המגנטי בלי להסתכל על הסליל, אלא על ידי בדיקת הסחת נקודת האור על המרקע?

בשאלות ההכנה, סעיפים 1ב' ו- 3 מיועדים לסטודנטים של מעבדה פיסיקלית 2 אשר מקבלים עבור המעבדה נקודה וחצי אקדמית. הסטודנטים שלומדים במסלול מעבדה פיסיקלית 2 ח' פטורים מסעיפים אלו.

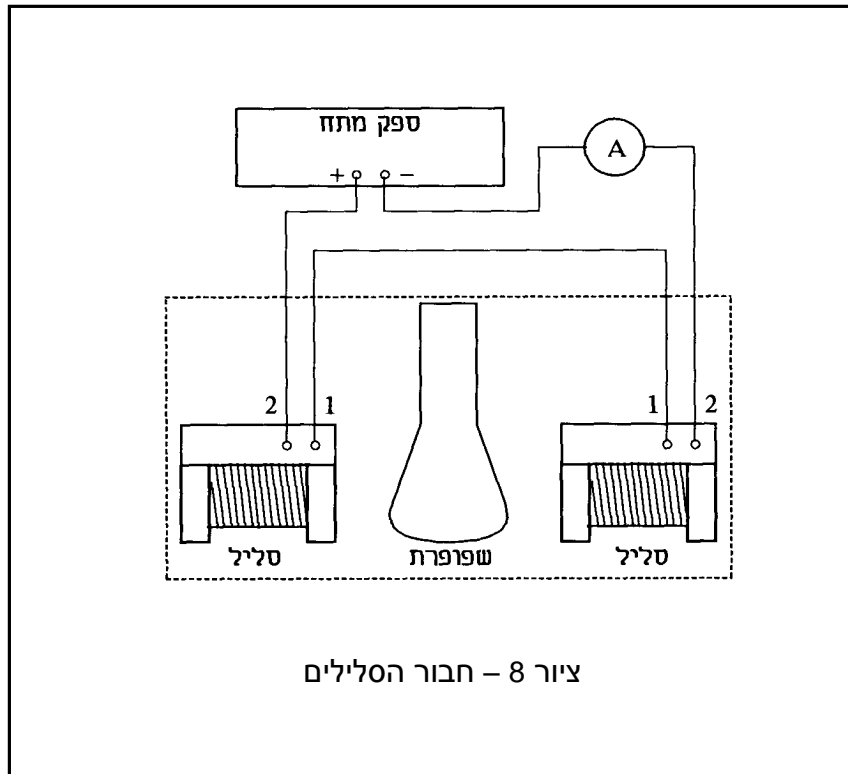
ניסוי 1 – מהירות התחלתית ניצבת לשדה B: $V_z = 0$



ציור 7

א. הכנה לניסוי

1. על שולחן המעבדה תמצאו אוסצילוסקופ אנלוגי עם שק"ק (ראה ציור 7), שני סלילים שמייצרים שדה מגנטי לכיוון ציר Z (ראו ציור 1) שניצבת למסלול האלקטרונים ושני ספקי מתח עד 50V. כדי להפעיל את הסקופ יש לסובב את המתג POWER. תותח האלקטרונים נראה דרך חלון שקוף בסקופ אנלוגי. בגב של הסקופ ישנם שלושה זוגות שקעים. זוג השקעים שרשום עליהם V_A מיועד למדידת מתח גבוה על השק"ק. כדי לקבל קריאה נכונה של המתח הגבוה יש להכפיל את קריאת המולטימטר ב- 10,000. נוח לבחור בסקלה של 2V במולטימטר ואז תקבלו ישיר את קריאת המתח בוולטים.
2. בצד ימין של הסקופ נמצא מתג עגול בצבע אדום והוא מיועד לשינוי של המתח הגבוה. כדי לשנות את המתח הגבוה יש לסובב את המתג. קיימים שישה מצבים קבועים של המתג הזה. **חשוב: יש לסובב את המתג בעדינות, אין להפעיל עליו כוח רב.**
3. האריקו את כל החיבורים של לוחות ההסחה. מתגים CH1 INPUT ו- CH2 צריכים להיות במצב GND.
4. הבורר TRIG צריך להיות במצב X-Y.
5. המצב של שאר המתגים והכפתורים של הסקופ לא משנה.
6. חברו את הסלילים לספק 50V בטור, כך ששני הסלילים תורמים שדה מגנטי באותו כיוון. היעזרו בציור 8.



7. לאחר בדיקת המדריך, הדליקו את הספקים.

8. כווננו בעזרת כפתור FOCUS את הנקודה על המרקע כך שהיא תהיה קטנה וחדה.

ב. ניסוי איכותי

בדקו את תחום ההשתנות של ההסחה a כפונקציה של V_A ו- i .

ג. ניסוי כמותי

1. מטרתנו בניסוי זה היא להעריך את e/m . מצאנו במשוואות (19) ו- (19') שההסחה יחסית ל- $i/\sqrt{V_A}$ ושגורם הפרופורציה K_1 מכיל את $\sqrt{e/m}$. כדי למצוא את K_1 , נמדוד את ההסחה עבור ערכים שונים של V_A ו- i ונערוך גרף של ההסחה a כפונקציה של $i/\sqrt{V_A}$. הכינו גיליון עבודה אלקטרוני EXCEL לקבל את תוצאות המדידה, והכינו גם את התשתית לגרף של התוצאות.

מדדו את ההסחה a כפונקציה של הזרם i עבור ערך אחד של V_A . מדדו את V_A במולטימטר. מאחר וקיימים שני לוחות ברזל (אותם ניתן לראות דרך חלון שקוף על הצד העליון של הסקופ) יש לחזור על כל מדידה לפחות פעמיים לפני שרושמים את התוצאה בגיליון אלקטרוני EXCEL כדי להחסיר את המגנטיזציה של ברזל.

2. רשמו את התוצאות בגיליון אלקטרוני EXCEL במחשב המעבדה, ובדקו את הגרף שנוצר של a לעומת $i/\sqrt{V_A}$. אל תשכחו גם להפוך את כוון הזרם כדי לקבל גם הסחה בכוון הפוך.
3. חזרו על המדידות עבור ערך אחר של V_A . הוסיפו מדידות אלה לגרף. האם הנקודות החדשות נופלות על אותה עקומה? האם העקומה היא קו ישר?

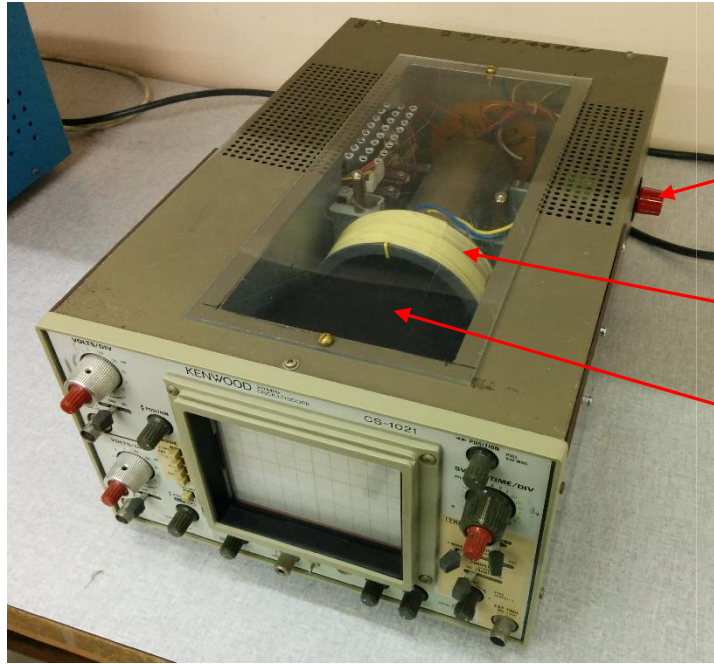
ד. ניתוח נתונים

1. מצאו את שני הקווים הישרים המתאימים ביותר לנקודות המדודות, כל אחד המתאים ל- V_A שלו. היעזרו ברגרסיה. הוסיפו את הקווים שמצאתם לגרף, וצרפו אותם לדו"ח המסכם. שימו לב במידה והשתמשתם ב-Trendline חובה עליכם להציג את המשוואה שלו על הגרף המתאים. גם כאן השוו את הערך של K_1 המתקבל ממתח V_A אחד לזה של V_A השני כדי לוודא ש- K_1 אינו תלוי במתח האצה.
2. העריכו את ערכי הפרמטרים b ו- (B/B_0) המופיעים בגורם הפרופורציה K_1 (ראו משוואה-19'). מאחר וקיימים שני לוחות ברזל (אותם ניתן לראות דרך החלון השקוף על הצד העליון של הסקופ) שחוסמים חלקית את השדה המגנטי, החישוב של B/B_0 מסובך. לכן צוות מעבדה מדד את השדה המגנטי בין לוחות הברזל בעזרת מכשיר גאוסמטר. קיבלנו שבמרכז השק"ק: $B/B_0 = 0.1$
- הציבו ערכים אלה ב- K_1 הממוצע של השניים שמצאתם עבור שני מתחי ההאצה השונים, ומכאן מצאו הערכה ליחס e/m .
3. מצאו את השגיאה האפשרית בערך של e/m כך שתוכלו להשוות את הערך שמדדתם לערך המקובל בספרות.

ניסוי 2 - מהירות התחלתית שאינה ניצבת לשדה B (תנועה הלית)

א. הכנה לניסוי

1. שדה מגנטי (שאינו ניצב למסלול של האלקטרונים) מקבלים בעזרת הסליל שיושב על השק"ק (ראו ציור 9). את הסליל רואים דרך חלון שקוף על הצד העליון של הסקופ
2. חברו את הסליל לספק מתח 50V. בגב של הסקופ ישנו זוג שקעים שרשום אליהם V_s . זאת כניסה לסליל. מחברים לשקעים האלו ספק מתח 50V ומחברים אמפרמטר בטור למדידה מדויקת של זרם בסליל בדומה לחיבורים בניסוי 1. אין להשתמש באמפרמטר של ספק מתח 50V כי הוא אינו מדויק.



ציור 9

3. האריקו את לוחות ההסחה. מתג CH1 INPUT ו- CH2 צריך להיות במצב GND

ב. ניסוי איכותי

1. בדקו את תחום ההשתנות של ההסחה כפונקציה של V_d , V_A ו- i . אפשר לשנות את המתח V_d בעזרת כפתור POSITION של הערוץ CH1 או לחלופין אפשר לחבר ספק שני של 50V לערוץ CH1 ולהעביר מתג INPUT של הערוץ הזה למצב DC. האם אתם מבחינים בקוליאוידה?
2. מצאו תנאי עבודה נוחים: בחרו V_A ו- V_d כך שההסחה היא כ- 3 cm כאשר $B = 0$.

ג. ניסוי כמותי

מדדו בעזרת סרגל קטן (לבקש מהמדריך) את הקואורדינטות של נקודת האור, ורשמו את ערך הזרם בסליל. רשמו את התוצאות בגיליון אלקטרוני EXCEL במחשב המעבדה. עברו לזרם אחר, מדדו את הקואורדינטות של הנקודה החדשה ורשמו שוב את הזרם, לא לשכוח לרשום קואורדינטות של הנקודה בה הזרם הוא 0. המשיכו כך עד להשלמת הקוליאוידה. יש לקחת את מירב נקודות המדידה בתחילת הקוליאוידה (עד 180 מעלות).

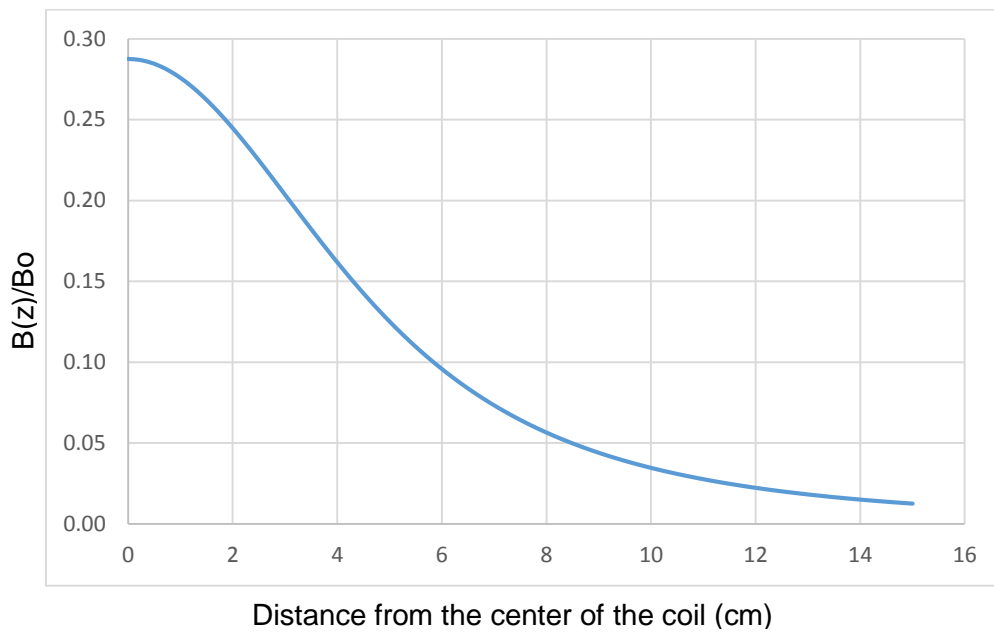
ד. ניתוח נתונים

1. כדי לקבוע את הזוויות ϕ צריכים למדוד את הקואורדינטות של הנקודות שמצאתם. קודם יש לקבוע את מערכת הצירים. לשם כך, התבוננו בציור 4. ציר y הוא קו ישר העובר דרך הנקודה המתאימה ל $i = 0$ ומשיק לספירלה. ציר x הוא קו הניצב לציר y העובר בנקודת המשיק.
2. רשמו את ערכי הקואורדינטות ואת ערכי i בגיליון האלקטרוני. חשבו את ערכי ϕ המתאימים לכל נקודה. שימו לב! הזוויות ϕ תמיד עולה ואילו הפונקציה \tan^{-1} מוגדרת במחשב כך שהיא מחזירה ערכים בין $-\pi/2$ לבין $\pi/2$, לכן יש להוסיף π לזוויות המתקבלות במחשב כל פעם שהזווית מגיעה לכפולה שלמה של $\pi/2$.
3. הכינו גרף של הנקודות המדודות: ϕ לעומת $i/\sqrt{V_A}$.
4. חשבו את $r_0 \sin \phi / z$ של הנקודות המדודות. הכניסו ערכים אלה (כפונקציה של $i/\sqrt{V_A}$) בגרף שהכנתם. האם נקודות אלה נופלות על אותה עקומה? מדוע? (ראו משוואה 16)
5. מצאו את הקו הישר המתאים ביותר לנקודות המדודות. בעזרת רגרסיה, הוסיפו את הקו הישר שמצאתם לגרף. הוסיפו את הגרף לדו"ח המסכם. שימו לב גם כן במידה והשתמשתם ב Trendline חובה עליכם להציג את המשוואה שלו על הגרף המתאים (כיצד לעשות זאת ראה בפרק 6 סעיף 2 בעמוד 82).
6. העריכו את ערכי הפרמטרים L ו- (B/B_0) המופיעים בגורם הפרופורציה K_2 (ראו משוואה (20')). השתמשו בגרף שבציור 10 לקבלת הערכה של B/B_0 . בגרף הזה נקודה $Z = 0$ נמצאת במרכז הסליל. הציבו ערכים אלה בביטוי של K_2 , ומכאן מצאו הערכה ל e/m .
7. מצאו את השגיאה האפשרית בערך של e/m . השוו לערך הקודם שקיבלתם ולערך המקובל בספרות. מה המסקנות שאפשר לקבל מהניסוי?

גדלים של הסליל לניסוי 2 (תנועה הלית)	
h	$0.0165 + 0.0005 \text{ m}$
R	$0.0525 + 0.0005 \text{ m}$
R'	$0.0575 + 0.0005 \text{ m}$
n	36450 m^{-1}

טבלה 2. (ראה הסבר על הגדלים בציור 5)

התוצאות של החישובים (ראו נוסחה 17) של השדה המגנטי נתונות באופן גרפי בציור 10.



ציור 10

קבועים ויחידות שבשימוש בניסוי זה:

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ weber/amp-m}$$

$$e = 1.6021 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

$$m = 9.1091 \cdot 10^{-31} \text{ Kg}$$

$$1 \text{ eV} = 1.6021 \cdot 10^{-19} \text{ Joule}$$

$$1 \text{ Ampere} = 1 \text{ C/s}$$

$$1 \text{ Volt} = 1 \text{ Kg-m}^2/(\text{C-s}^2)$$

$$1 \text{ Tesla} = 1 \text{ Kg}/(\text{C-s})$$