

---

# תנועת אלקטרונים בשדה חשמלי

---

---

## מטרות המעבדה:

---

- לחקור תנועת אלקטרונים בשדה חשמלי.
- להכיר שפופרת קרן קתודה.

---

## ספרות עזר:

---

- Mechanics, Berkeley Physics Course, Vol. 1, Chapter 4.

---

## מכשור:

---

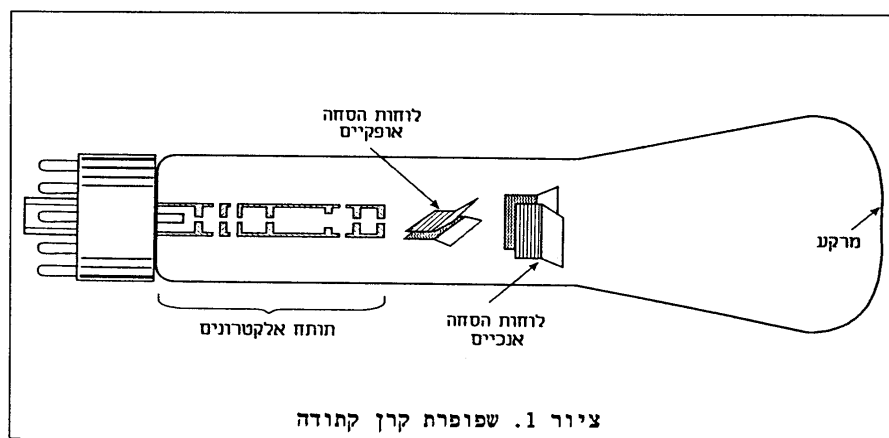
אוסצילוסקופ אנלוגי עם שפופרת 150UTM31, שני ספקי מתח עד 50V, שני מולטימטרים, תילים צבעוניים, כבל קואקסיאלי.

---

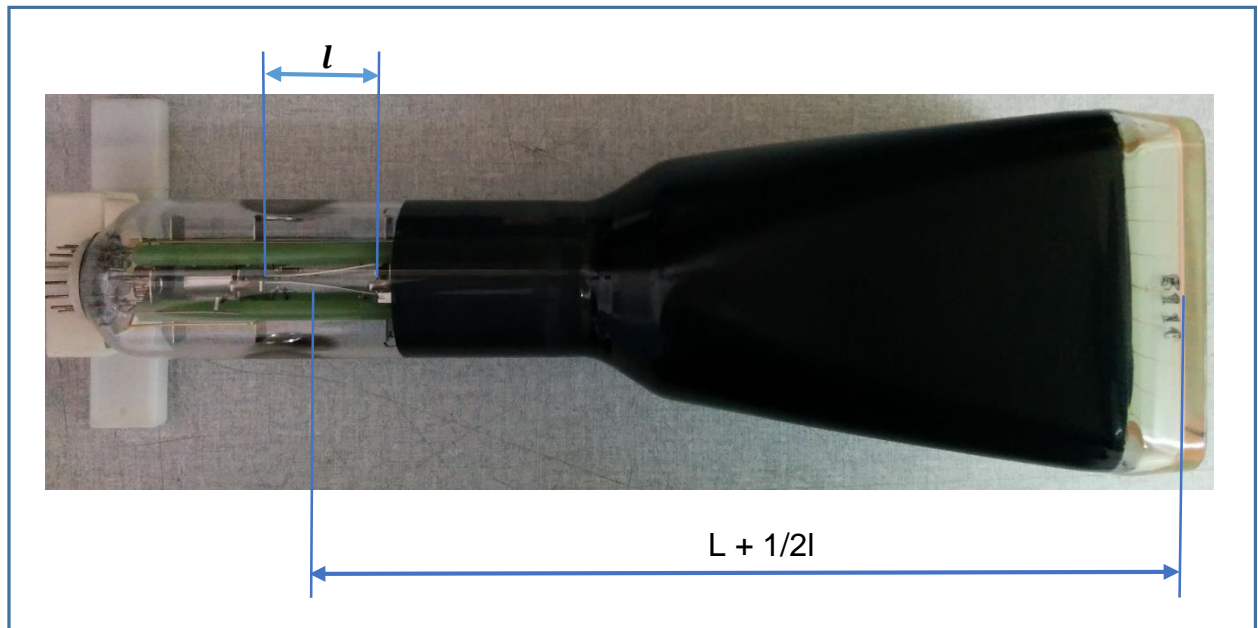
## שפופרת קרן קתודה

---

בניסוי הזה ובניסוי הבא נעבור מהתחום של העולם המַקרוסקופי אל העולם המיקרוסקופי -- מגדלים הנמדדים במידות של יום-יום, כגון סנטימטרים, גרמים, ומטרים לשנייה, לעולם של החלקיקים הזעירים ביותר, שמסתם נמדדת ביחידות של  $10^{-30}$  ק"ג, ומהירותם, (במעבדה שלנו!) נמדדת במיליוני מטרים לשנייה. בניסויים אלה נחקור את התנועה של אלקטרונים הנמצאים בשדות חשמליים ומגנטיים. האלקטרונים נוצרים על ידי תותח אלקטרונים בתוך שפופרת זכוכית המרוקנת מאוויר (לחץ  $\approx 10^{-6}$  atm) הנקראת שפופרת קרן קתודה או שק"ק בראשי תיבות ובאנגלית

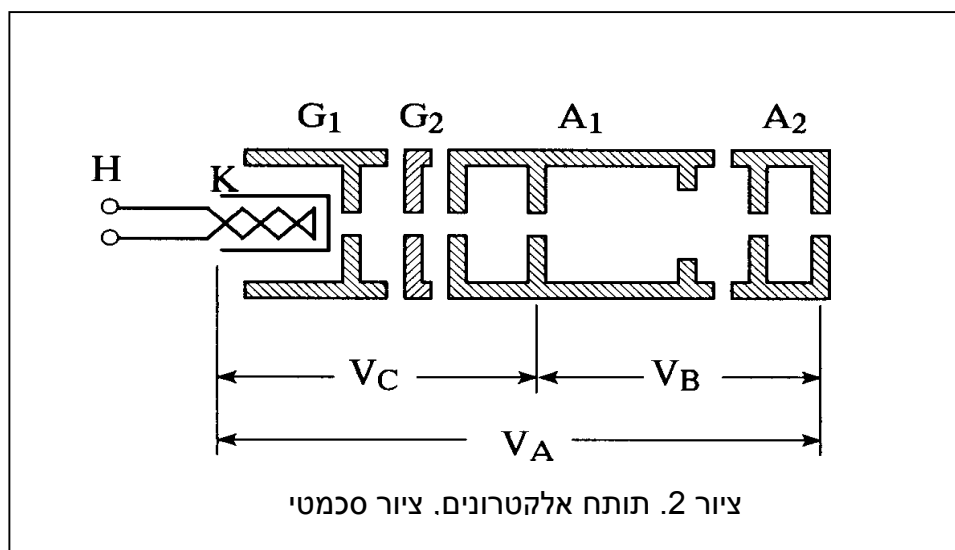


Cathode Ray Tube או CRT. שפופרת זאת היא המרכיב העיקרי באוסצילוסקופ, שהוא מכשיר מדידה חשוב ביותר במדע ובטכנולוגיה.



ציור 1א. שק"ק שמשמשים בניסוי

השפופרת מתוארת בציור 1. אלקטרונים נפלטים מקתודה לוהטת, מואצים וממוקדים על ידי מערכת אלקטרודות הנקראת תותח אלקטרונים. האלומה של האלקטרונים אינה מתפזרת על ידי התנגשויות עם מולקולות, כיוון שהשפופרת מרוקנת מאויר. האלקטרונים נעים באופן חופשי עד שהם פוגעים

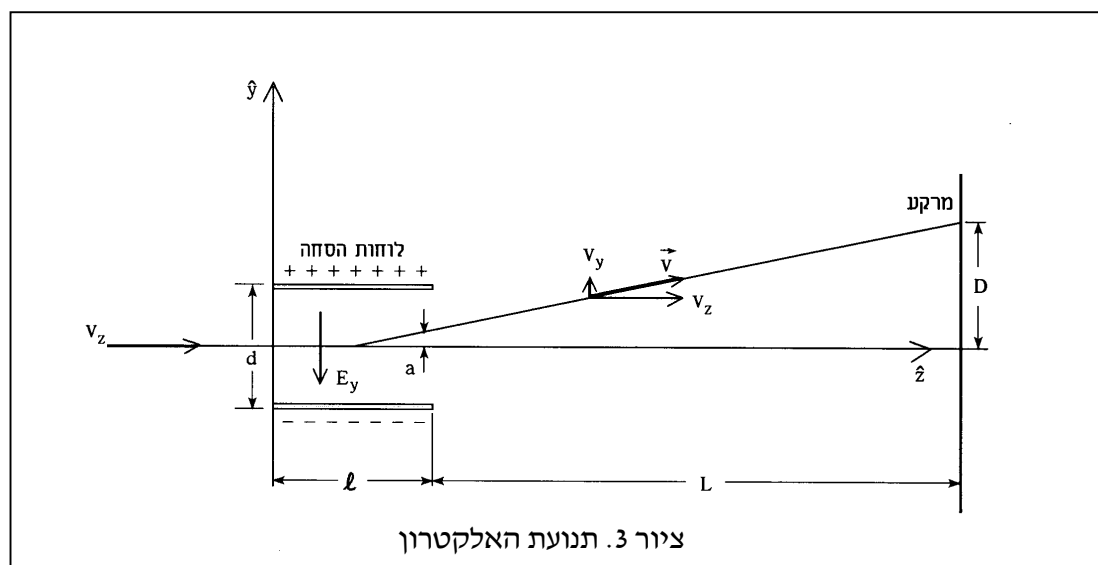


בדופן הקדמי של השפופרת (המרקע) המצופה בחומר זרחני. חומר זה מאיר כאשר אלקטרונים



ציור 2א. תותח אלקטרוני בשק"ק שבמעבדה

פוגעים בו, ונקודת אור נראית על המרקע. אפשר ליצור שדות חשמליים בעזרת שני זוגות של לוחות מתכת הנמצאים בתוך השק"ק. אם יש הפרש פוטנציאל בין שני הלוחות השייכים לזוג, השדה החשמלי יגרום להסחת אלומת האלקטרונים, ולכן גם להסחת נקודת הפגיעה של האלומה במרקע. תותח האלקטרוני מתואר ביתר פירוט בציור 2. הקתודה K היא גליל צר שקצהו מצופה בתחמוצות של Sr-Ba. כאשר חומר זה מחומם, חלק מן האלקטרונים שלו מקבלים מספיק אנרגיה כדי להשתחרר, ונפלטים ממנו. תהליך זה נקרא פליטה תרמיונית. כדי לחמם את הקתודה משתמשים בחוט לוהט H (Heater), המבודד מהקתודה בשרוול העשוי קרמיקה. ארבע אלקטרודות מוצבות לפני הקתודה שתפקידן להאיץ ולמקד את אלומת האלקטרונים היוצאת מן הקתודה. האלקטרודה G1 היא שריג בקרה, ותפקידה לווסת את זרם האלקטרונים העובר דרכה. לצורך זה, שמים על השריג פוטנציאל שלילי של 4 עד 20 V ביחס לקתודה K. כיוון שהפוטנציאל הוא שלילי, אלקטרונים איטיים נדחים לקתודה, וכך ניתן לשלוט על עוצמת אלומת האלקטרונים. האלקטרודה G2 מחוברת ל-A<sub>2</sub>, ושתייהן שריוות בפוטנציאל V<sub>A</sub>, הגבוה במאות וולטים מזה של הקתודה K. השדה הנוצר על ידי אלקטרודות אלה מאיץ את אלקטרונים לאורך ציר השפופרת. התפקיד של אלקטרודה A<sub>1</sub> הוא למקד את אלומת האלקטרונים. היא שרויה בפוטנציאל הקתודה, אבל הפוטנציאל שלה נמוך לעומת V<sub>A</sub>. זה גורם לשדות חשמליים בין G<sub>2</sub> ו-A<sub>1</sub> ובין A<sub>1</sub> ו-A<sub>2</sub> הממקדים את האלומה. האלקטרונים היוצאים מהחריר שב-G<sub>1</sub> בכוונים שונים מרוכזים לאלומה מקבילה וצרה שקוטרה נקבע בעיקר ע"י קוטר החריר ב-G<sub>2</sub>. מיקוד טוב תלוי בעיקר בבחירת הפוטנציאלים V<sub>C</sub> ו-V<sub>A</sub>.



כדי לנתח את התנועה של האלקטרון בתוך השפופרת, אנו נבנה מודל פשוט, שאינו מתאר במדויק את המערכת, אך ניתן לחישוב בצורה פשוטה. אנו נניח שבין לוחות ההסחה יש שדה  $E$  קבוע הניצב ללוחות, ומחוץ ללוחות השדה מתאפס. התנועה של האלקטרון במודל זה מתוארת בציור 3. ציר  $\hat{z}$  הוא לאורך ציר השפופרת, וציר  $\hat{y}$  בכיוון הניצב. בזמן  $t = 0$  אלקטרון נמצא בראשית הצירים עם מהירות  $v_z$  בכיוון  $\hat{z}$ . הוא עובר את האזור בין הלוחות ומגיע לנקודה  $y = a, z = l$  בקצה הלוחות עם מהירות  $v_y$  בכיוון  $\hat{y}$ . אחר כך הוא עובר את המרחק  $L$  ופוגע במרקע. ההסחה שלו (בכיוון  $\hat{y}$ ) על המרקע היא  $D$ . אם מתקיים  $\vec{E} = E_y \cdot \hat{y} = E \cdot \hat{y}$ .

משוואת התנועה של האלקטרון בשדה  $\vec{E}$  היא:

$$m\ddot{y} = eE \quad (1)$$

הפתרון למשוואה זאת עם תנאי ההתחלה  $y(0) = 0, \dot{y}(0) = 0$  הוא:

$$\dot{y} = eEt/m \quad (2a)$$

$$y = \frac{eEt^2}{2m} \quad (2b)$$

המהירות שלו בכיוון  $\hat{z}$  אינה משתנה:

$$z = v_z t \quad (3)$$

לכן הוא מגיע לקצה הלוחות, לנקודת  $z = l$ , בזמן  $t = l/v_z$ . אם מציבים זאת במשוואות (2), מקבלים את הביטויים הבאים עבור המהירות הסופית  $v_y$  וההעתק בקצה הלוחות  $a$ :

$$v_y = (eE/m)(l/v_z) \quad (4a)$$

$$a = (eE/2m)(l/v_z)^2 \quad (4b)$$

הזמן  $T$  הדרוש לעבור את האזור שאחרי הלוחות בעל האורך  $L$  הוא  $T = L/v_z$  (לפי משוואה 3). המהירות של האלקטרון בכיוון  $\hat{y}$  באותו אזור היא קבועה ושווה ל- $v_y$  ולכן ההסחה בכיוון  $\hat{y}$  באזור הזה היא:  $v_y L/v_z = v_y T$ .

לסיכום:

$$D = a + Lv_y/v_z = (eE/mv_z^2) l (L + \frac{1}{2}l) \quad (5)$$

אם  $V_d$  הוא המתח על לוחות ההסחה ו- $d$  המרחק בין הלוחות, אזי  $E = V_d/d$ . המהירות  $v_z$  היא תוצאה של תאוצה במתח  $V_A$ . לפי חוק שימור אנרגיה:

$$\frac{1}{2}mv_z^2 = e \cdot V_A \quad (6)$$

אם מציבים את (6) ב- (5) מקבלים:

$$D = \frac{1}{2}[l(L + \frac{1}{2}l)/d] (V_d/V_A) \quad (7)$$

התוצאה הזו היא מעניינת כי היא אומרת שההסחה של חלקיק טעון כלשהו היא שווה! ההסחה אינה תלויה במטען החלקיק או במסתו, אלא רק בממדים הגיאומטריים של השפופרת וביחס  $V_d/V_A$ . לוחות ההסחה בשק"ק אינם לוחות מישוריים. הם מתוארים בציור 1 של ניסוי זה. הביטוי עבור ההסחה  $D$  יהיה שונה ממשוואה (7). יחד עם זאת, לא קשה להראות שתלות ב- $V_d/V_A$  לא תשתנה, כלומר:

$$D = \alpha \frac{V_d}{V_A} \quad (8)$$

כאשר  $\alpha$  הוא גורם פרופורציה בעל מימד אורך שמבטא את הערך האפקטיבי של  $\frac{1}{2}l(L + \frac{1}{2}l)/d$ . בניסוי הנוכחי, נבדוק באיזה מידה מתקיים הקשר (8).

מידות גיאומטריות בשק"ק (ראה ציור 1 וציור 3)	
$L + \frac{1}{2}l = 252.0 \pm 0.5 \text{ mm}$	מרחק מאמצע זוג לוחות ההסחה למרקע
$l = 36.4 \pm 0.1 \text{ mm}$	אורך לוח ההסחה
$d = 2.0 \pm 0.1 \text{ mm}$	מרחק בין זוג לוחות אופקיים

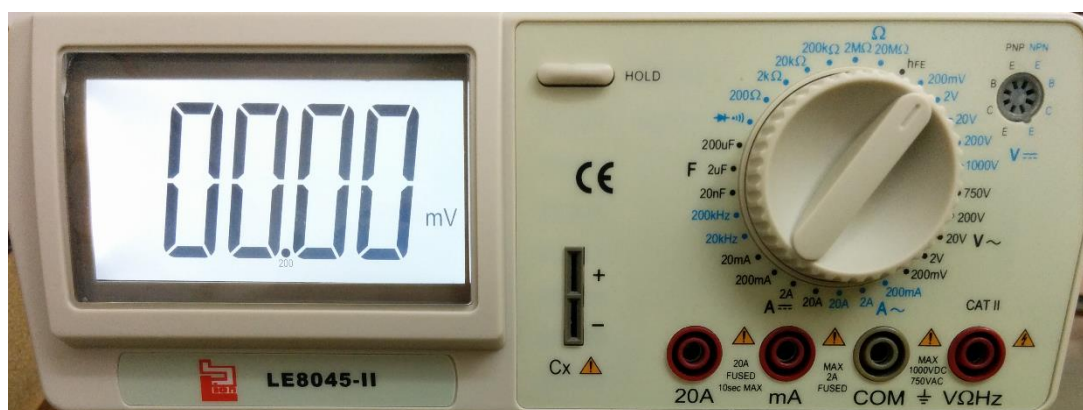
## שאלות הכנה

- הרגישות של לוחות ההסחה מוגדרת כ-  $D/V_d$ . מצאו ביטוי לרגישות כפונקציה של  $d$ ,  $l$ ,  $L$ . האם הרגישות תלויה במתח ההאצה? האם הרגישות תלויה בסוג החלקיק המואץ?

2. לאיזה זוג לוחות יש רגישות גדולה יותר (ראה ציור 1)? מהו יחס הרגישויות?
3. אם מתח ההאצה הוא  $V_A = 2000\text{ V}$ , איזה מתח הסחה  $V_d$  דרוש לזוג הלוחות כדי להסיח את האלומה ב-  $3\text{ cm}$ ? הניחו כי השדה החשמלי קבוע בין הלוחות ומתאפס מחוץ ללוחות.
4. חשבו את המהירות  $v_z$  של האלקטרון עבור  $V_A = 1300\text{V}, 1400\text{V}, 1500\text{V}$ .
5. מדוע מותר להזניח את כוח הכובד הפועל על האלקטרון? הצדיקו הזנחה זאת בהנחה ש-  
 $V_A > 1000\text{V}$ .

## מכשיר מדידה – המולטימטר הדיגיטלי

מכשיר המדידה שלנו במעבדה הוא המולטימטר הדיגיטלי. מכשיר זה הוא רב-תכליתי ומדויק מאוד. הוא מודד מתחים, זרמים והתנגדויות בתחומי פעולה שונים. תחומי הפעולה משתנים בששה סדרי גודל. תמונת המולטימטר נראית בציור 4.



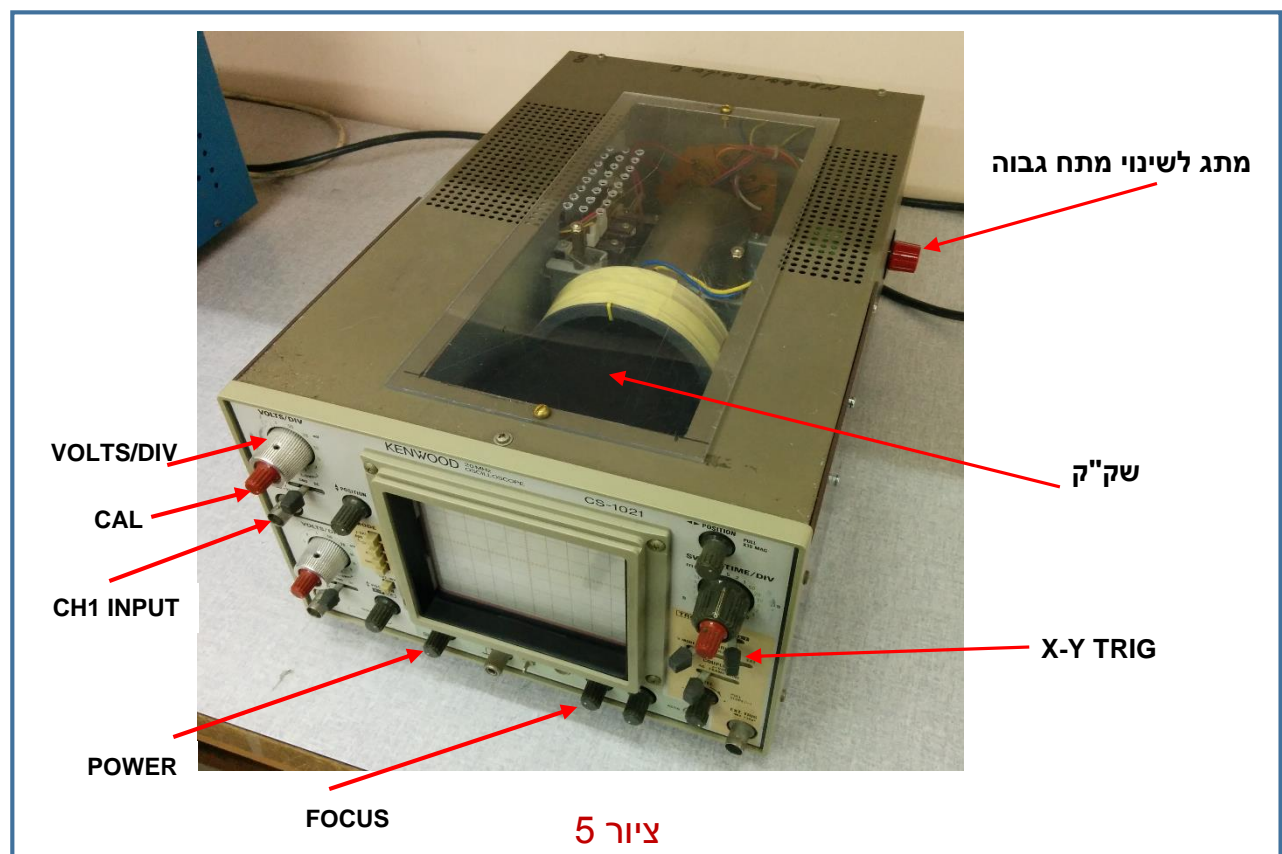
ציור 4

הוראות הפעלה של המולטימטר הן כדלקמן:

1. הדליקו את המכשיר בעזרת המתג שנמצא בגב של המכשיר.
2. בחרו את הפונקציה הנמדדת ואת תחום המדידה הרצוי על ידי סיבוב על המתג העגול. הפונקציות השונות והיחידות שלהן רשומות על המכשיר בצבע כחול או שחור.
3. רצוי להתחיל עם התחום הגדול ביותר ולרדת לתחום רגיש יותר במידת הצורך. המספר הכתוב ליד המתג העגול נותן את המספר הגדול ביותר הנמדד בתחום הפעולה הנדון. לדוגמא, אם בחרתם על המספר המסומן ב- $200\text{V}$ , אזי אפשר למדוד מתחים עד  $200\text{V}$ . אם מנסים למדוד גודל מעל זה, המספרים בתצוגה יהבהבו.
4. מחברים את מקור המתח (או זרם) הנמדד עם שני תילים מסוג "בננה". תיל אחד (בצבע שחור) מחברים אל הכניסה COM. אם מודדים מתח או התנגדות, מחברים את התיל השני (בצבע אדום) לכניסה  $V\Omega\text{Hz}$ . אם מודדים זרם, מחברים את התיל השני ל- $\text{mA}$  או  $20\text{A}$  בהתאם לגודל הזרם הצפוי.

על שולחן המעבדה תמצאו אוסצילוסקופ (סקופ) אנלוגי עם שק"ק, ראה ציור 5, ושני ספקי מתח עד 50V כדי להפעיל את הסקופ יש לסובב את המתג POWER. תותח האלקטרונים נראה דרך חלון שקוף בסקופ האנלוגי. בגב של הסקופ ישנם שלושה זוגות שקעים. זוג השקעים שרשום עליהם  $V_a$  מיועד למדידת מתח ההאצה (מתח גבוה) על השק"ק. כדי לקבל קריאה נכונה של המתח הגבוה יש להכפיל את קריאת המולטימטר ל-10,000. נוח לבחור בסקלה של 2V במולטימטר ואז תקבלו ישיר את קריאת המתח בוולטים. זוג השקעים שרשום עליהם  $V_d$  מיועד למדידת מתח על זוג לוחות הסחה אנכיים. בצד ימין של הסקופ נמצא מתג עגול בצבע אדום והוא מיועד לשינוי של מתח ההאצה. כדי לשנות את מתח ההאצה יש לסובב את המתג. קיימים שישה מצבים קבועים של המתג הזה.

**חשוב: יש לסובב את המתג בעדינות, אין להפעיל עליו כוח רב.**



1. בניסוי הזה נשתמש בזוג לוחות הסחה אופקיים בלבד.
- חברו זוג לוחות אנכיים לספק 50V בעזרת כבל קואקסיאלי. ראה ציור 6 והסבר בסעיף 2.



ציור 6

2. הכניסה לזוג הלוחות האופקיים מסומנת ב- CH1 INPUT ראה ציור 5 , והכניסה לזוג הלוחות האנכיים מסומנת ב- CH2 INPUT. כדי להתחבר לכניסה של לוחות ההסחה יש להשתמש בכבל קואקסיאלי (ציור 6). בצד אחד של הכבל ישנו מחבר BNC ובצד השני זוג תילים מסוג "בננה".

3. יש לוודא שמתג CH1 INPUT נמצא במצב DC. **תעבירו גם את הבורר VOLTS/DIV ל-5V** **וסובבו את הכפתור האדום CAL לכיוון השעון עד הסוף (ראה ציור 5).**

4. האריקו את הלוחות אנכיים. מתג CH2 INPUT צריך להיות במצב GND

5. הבורר TRIG צריך להיות במצב X-Y

6. המצב של שאר המתגים והכפתורים של הסקופ לא משנה.

7. הדליקו את הסקופ ואת הספק של 50V.

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

**חשוב: בסיום הניסוי או בהפסקות ארוכות יש לכבות את הסקופ וספקי מתח.**



## ניסוי איכותי

שנו את המתח  $V_d$  על הלוחות בעזרת ספק מתח 50V ושימו לב לתחום השתנות של ההסחה D בהתאם. אם הקו שאתם מקבלים לא אנכי חברו ספק מתח 50V לזוג שקעים  $V_s$  שנמצאים בגב של הסקופ והעלו בהדרגה את המתח עד שתקבלו קו אנכי. יכול להיות שתצטרכו להחליף את הקוטביות של המתח. הסבר על הכניסה  $V_s$  תקבלו בניסוי הבא: תנועת אלקטרונים בשדה מגנטי. וודאו שהנקודה  $D=0$  נמצאת בראשית הצירים. חזרו על השלב הזה עבור מתחי האצה  $V_A$  שונים.

## ניסוי כמותי

1. למדידת  $V_d$  חברו מולטימטר לזוג השקעים שנמצאים בגב של הסקופ ומסומנים ב- $V_d$ . למדידת המתח  $V_A$  חברו מולטימטר לזוג השקעים שנמצאים בגב של הסקופ ומסומנים ב- $V_A$ .
2. מטרתנו בניסוי היא לבדוק את הקשר התיאורטי (8). לכן נמדוד את ההסחה עבור ערכים שונים של  $V_A$  ו- $V_d$ , נערוך גרף של ההסחה כפונקציה של היחס  $V_d/V_A$ . הכינו גיליון עבודה אלקטרוני EXCEL לתוכו תקלידו את תוצאות המדידה, והכינו גם את התשתית לגרף של המדידות.
3. מדדו את ההסחה D כפונקציה של  $V_d$  עבור ערך אחד של  $V_A$ . נוח למדוד את  $V_d$  עבור ערכים נתונים של D, לדוגמא, כל 0.5cm. כמו כן, נוח להכניס את תוצאות המדידה ישר לגיליון העבודה, תוך כדי המדידות. רצוי להסתכל מדי פעם בגרף הנוצר: אם טעיתם במדידה כלשהי, הטעות מיד תתגלה. אל תשכחו למדוד ערכים שליליים של  $V_d$  על ידי הפיכת הקוטביות.
4. מדדו את ההסחה D כפונקציה של  $V_A$  עבור ערך אחד של  $V_d$ . עשו זאת עבור שישה ערכים שונים של  $V_A$ . שמרו על הערך  $V_d$  קבוע ושינו רק את המתח ההאצה  $V_A$ . הוסיפו את הנתונים החדשים לגרף של D לעומת  $V_d/V_A$ .

שמרו את כל התוצאות בקובץ EXCEL במחשב המעבדה.

אי שמירת התוצאות במחשב המעבדה יכולה לגרום לפסילת הניסוי.

## ניתוח נתונים

1. מצאו את הקווים הישרים המתאימים ביותר לנקודות המדודות.
- יש למצוא את הקווים המתאימים לנוסחה (8) לשני המקרים  $V_A$  קבוע ו- $V_d$  קבוע.
2. היעזרו ברגרסיה של הגיליון האלקטרוני. הוסיפו את הקווים הישרים שמצאתם לגרף, וצרפו את הגרף לדו"ח המסכם. במידה והשתמשם ב-Trendline, הוא אינו מחשב שגיאה ולכן אין הדבר פוטר אתכם מהשימוש ברגרסיה על כל מקרה וכל מטרתו של ה-Trendline הוא כאפשרות לשרטט את קו הרגרסיה בנוחיות. מאחר שמטרתו של שרטוט הקו היא בדיקת הרגרסיה עצמה,

וה-Trendline נעשה ללא קשר לרגרסיה, יש לבקש מה Excel להדפיס את המשוואה של ה-Trendline על הגרף, וזאת כדי לבדוק ולהראות שהרגרסיה נכונה. עושים זאת ע"י כך שכאשר אתם בתפריט שבו אפשר ללחוץ על Add-Trendline (או מתפריט ה-Chart או מהמקש הימני של העכבר לאחר שהצבעתם על אחת מהנקודות של ה-Series המתאים) מגיעים לחלון בעל הכותרת Add-Trendline שיש בו שני כרטיסים Type ו-Options עוברים לכרטיס Options ומסמנים v (on) במשבצת 'Display equation on chart'.

3. השוו את ערכי השיפוע  $\alpha$  שקיבלתם ברגרסיה בשני המקרים (ראה סעיף 1) השונים והוכיחו ש  $\alpha$  אינה תלויה במתח ההאצה  $V_A$ .

4. לכל מדידה בנפרד קחו את הערך של  $\alpha$  שקבלתם בסעיפים הקודמים (כולל חישוב השגיאה) והשוו אותו עם ערך  $\alpha$  המתקבל במודל הפשוט, כלומר ל- $\frac{1}{2}l(L + \frac{1}{2}l)/d$ . (ראו משוואות 7 ו-8). עשו זאת תוך התחשבות בשגיאות של כל אחד מהגדלים.

5. במסקנות דונו בין היתר גם עד כמה המודל הפשוט מתאים לרמת הדיוק של המכשירים, כלומר ייתכן בניסוי זה מצב שבו רמת הדיוק של המכשירים גבוהה מרמת הדיוק של הקירוב במודל הפשוט, מהם הקירובים של המודל הפשוט? ומתי מותר לנו לעשות אותם (התייחסו לגדלים הגיאומטריים של המערכת)? כיצד נראה זאת מהתוצאות (אם בכלל)? מהם הציפיות שלכם ומה קיבלתם? דונו במידת הליניאריות שקבלתם, מה זה אומר?