

חלק א' – מבוא

ניסוי זה יתרכז בחקירת ההאצה וההטיה של אלקטרונים בשדה חשמלי. אנו נבצע את חקירותינו באמצעות שפופרת קרן אלקטרונים, אשר מכונה לעיתים שפופרת קרן קתודית - שק"ק (Cathode Ray Tube - C.R.T). מקורו של כינוי זה הוא במחקרים הראשוניים שבוצעו באמצע המאה התשע-עשרה בנושא התפרקות חשמליות בגז בעל לחץ נמוך. בהתפרקות כזאת ניתן להבחין בקרינה כחלחלה באזור הקתודה (האלקטרודה השלילית). קרניים קתודיות אלו הן הפלואורוסנציה (זהירה) של אטומי הגז (המעוררים ע"י קרן האלקטרונים).

ישנן שתי סיבות חשובות להכרת השק"ק:

א. היסטורית, המחקרים בשק"ק, בייחוד אלו של תומסון (J. J. Thomson) בשנים 1903 - 1898, הביאו לגילוי האלקטרון. בעקבות כך, ובעקבות ניסויים אחרים, פותחו תיאוריות שתרמו להבנתנו את מבנה האטום. בימינו מבנה האטום ברור למדי, אולם עדיין קיימים מבנים תת אטומיים שהבנתנו אותם חלקית ביותר. פיסיקת הגרעין ופיסיקת החלקיקים האלמנטריים, החוקרות את תכונותיהם של המבנים התת אטומיים, מתבססות על תוצאות ניסויי פיזור המתבצעים במאיצי חלקיקים. הטכניקות שבהן מואצים החלקיקים ומוטים למסלולים רצויים, דומות לטכניקות אותן נכיר בניסוי זה, גם אם מדובר בסדרי גודל שונים לחלוטין מבחינת אנרגיות החלקיקים (כמו גם מבחינת עלות כספית...)

ב. השק"ק הנו "הלב" של מכשירי תצוגה אלקטרוניים רבים כמו האוסצילוסקופ, צג המחשב וצג הטלוויזיה.

הבסיס התיאורטי הנדרש להבנת הניסוי הוא הכרת המכניקה הקלאסית, המתארת בקירוב מצוין את תנועתם של גופים מקרוסקופיים בהנחה שמהירותם קטנה ביחס למהירות האור $c = 2.99792 \cdot 10^{10} \text{ cm/sec}$. מסת האלקטרון היא $9.109 \cdot 10^{-28} \text{ gr}$, הכוחות הפועלים בניסוי זה הם מסדר גודל של 10^{-8} dyne והאנרגיות האופייניות הן רק מסדר גודל של 10^{-9} erg .

חלק ב' – האצת והטית חלקיקים בשדה כוח

לפני שנסביר את פעולתו של השק"ק נדון תחילה בהאצתם והטייתם של גופים הנעים בשדה כוח, כדוגמה נבחר בגוף הנע בשדה גרביטציוני ובגוף (אלקטרון) הנע בשדה חשמלי. בדרך זו ניתן לעמוד על האנלוגיה בין שתי הבעיות השונות לכאורה:

- תנועת גוף בשדה גרביטציוני

- תנועת גוף (אלקטרון) בשדה חשמלי

תנועת גוף בשדה גרביטציוני

א. מסה M הנמצאת ליד פני כדור הארץ "מרגישה" כוח גרביטציוני $F_z = Mg$.

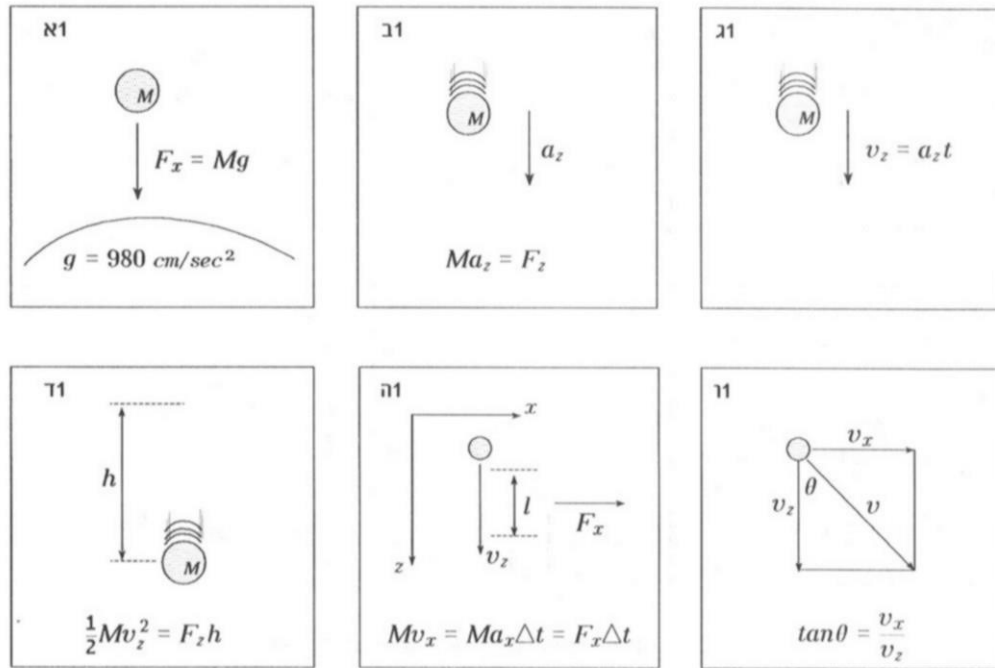
ב. אם משחררים את המסה M ממצב מנוחה, היא מואצת כלפי מטה בתאוצה קבועה $F_z = Ma_z$.

ג. אחרי שהמסה נפלה במשך זמן t היא קיבלה תנע בשיעור $Mv_z = F_z t$.

ד. כמו כן המסה מקבלת אנרגיה קינטית $\frac{1}{2}Mv^2$ השווה לעבודת השדה Mgh .

ה. אם בנוסף לכוח הגרביטציוני נפעיל כוח רוחבי (בניצב לכוון התנועה) F_x במשך זמן Δt , אזי המסה תקבל תנע רוחבי בשיעור: $Mv_x = F_x \Delta t$.

ו. המסה תוסט ממסלולה האנכי בזווית θ כך ש- $\tan(\theta) = \frac{v_x}{v_z}$ (ראו ציור 1).

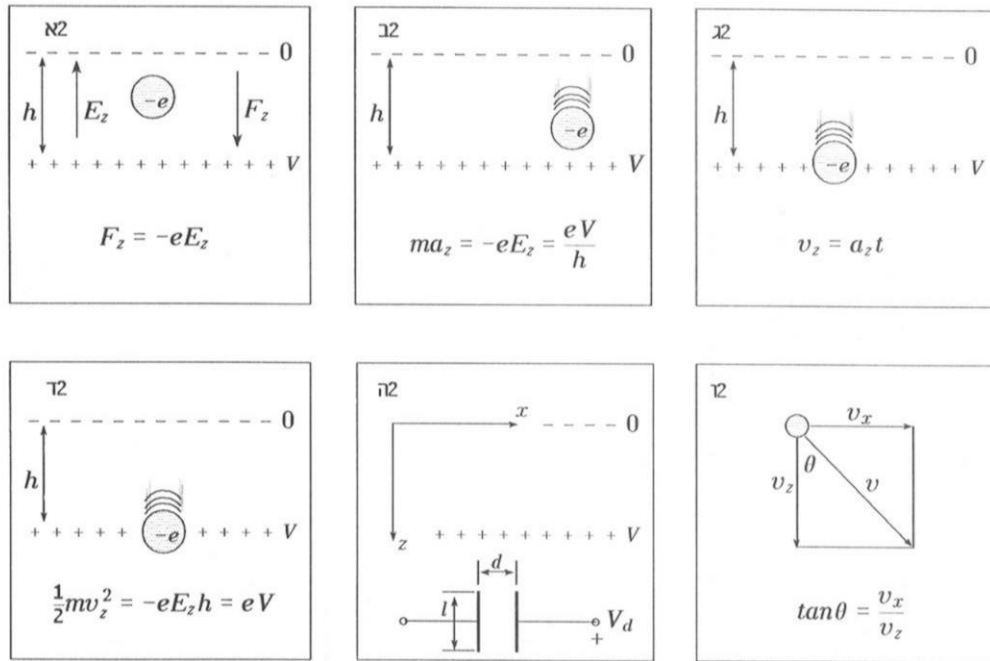


ציור 1: תנועת גוף בשדה גרביטציוני

תנועת גוף טעון (אלקטרון) בשדה חשמלי

- א. אלקטרון עם מטען e^- הנמצא בין שני לוחות טעונים "מרגיש" כוח

$$F_z = -eE_z = eV/h$$
- ב. אם הלוח התחתון בפוטנציאל חיובי, האלקטרון יואץ כלפי מטה בתאוצה קבועה.
- ג. אחרי שהאלקטרון הואץ במשך זמן t הוא קיבל תנע בשיעור $mv_z = F_z t$.
- ד. כמו כן האלקטרון רוכש אנרגיה קינטית $\frac{1}{2}mv^2$ השווה לעבודת השדה $-eE_z h = eV$.
- ה. אם כעת נפעיל שדה רוחבי $E_x = -v_d/d$ האלקטרון יקבל תנע $mv_x = -eE_x \Delta t$.
- ו. האלקטרון יוסט בזווית θ ממסלולו בכיוון ציר- z כך ש- $\tan(\theta) = \frac{v_x}{v_z}$ (ראו ציור 2).



ציור 2: תנועת חלקיק בשדה חשמלי

ניתן להכליל את הדיון לגבי הדינמיקה של חלקיק טעון בשדה אלקטרו-מגנטי:

על חלקיק בעל מטען חשמלי q אשר נע במהירות $\vec{v}$ בתוך שדה חשמלי $\vec{E}$ ושדה מגנטי $\vec{B}$ פועל כוח לורנץ, $\vec{F}$:

$$(1) \quad \vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$

בכח לורנץ נשתמש בהמשך לניתוח הדינמיקה של חלקיק טעון בשדה אלקטרו-מגנטי.

חלק ג' - שפופרת קרן קתודית (שק"ק)

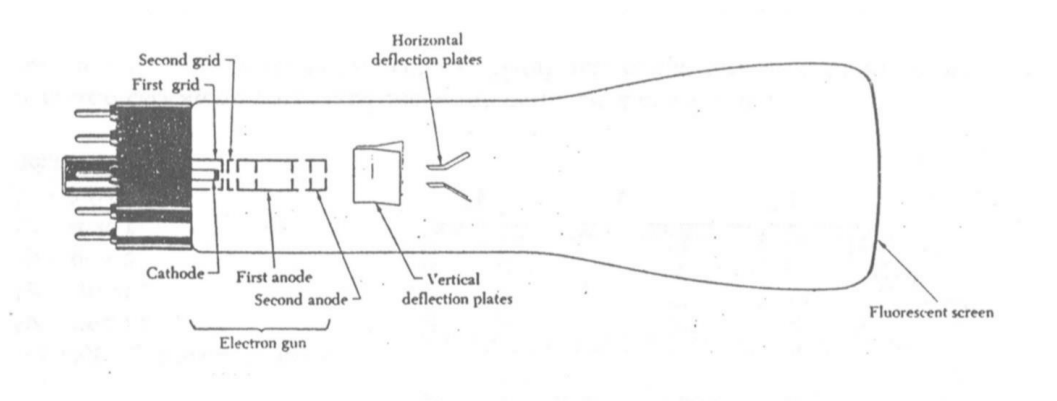
מבנה השק"ק

השק"ק בנוי משפופרת זכוכית שבתוכה שורר ואקום (כלומר, השפופרת מרוקנת מאוויר, (הלחץ הוא כ- 10^{-6} Atm) כדי לא להפריע לתנועת האלקטרונים.



ציור 3: צילום השק"ק

הרכיבים העיקריים בתוך השק"ק מתוארים באופן סכמתי בציור 4 (מבט מלמעלה). האלקטרונים נעים משמאל לימין.



ציור 4: שפופרת קרן קתודית (שק"ק)

בחלקה השמאלי של השפופרת מצויה הקתודה והיא המתקן הפולט את האלקטרונים (שיוצאו אח"כ בעזרת מתקנים אחרים). פני הקתודה מצופים בתחמוצות של בריום וסטרונציום שיש להם התכונה הבאה: כאשר מחממים תחמוצות אלה, חלק מהאלקטרונים שבאטומי התחמוצות מקבלים אנרגיה קינטית מהאטומים המתנוודדים עקב חימום, ואלקטרונים אלה נפלטים החוצה מהקתודה (אפקט זה נקרא בשם פליטה תרמיונית).

עמוד 5 מתוך 20

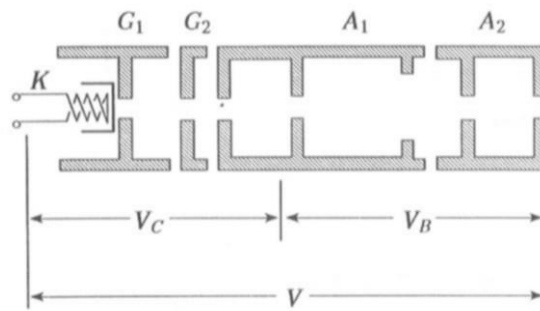
החימום מתבצע בעזרת גוף חימום הבנוי בתוך הקתודה, שבו זורם זרם חשמלי הנוצר ע"י מתח חילופין של 6.3 Volt.

מסביב לקתודה נמצא גליל מתכת ובו נקב קטן. זהו הסריג הראשון שאותו מחזיקים בפוטנציאל שלילי קטן (4.5 Volt) ביחס לקתודה. רוב האלקטרונים הנפלטים מהקתודה יפגעו בסריג הראשון, יאבדו את האנרגיה הקינטית שלהם עקב התנגשויות, ויחזרו אל הקתודה בגלל הפרש הפוטנציאלים. רק האלקטרונים המגיעים אל הנקב עם אנרגיה קינטית מספיק גדולה יצליחו להתגבר על "מחסום הפוטנציאל" ולהמשיך הלאה. בדרך זו משיגים קרן אלקטרונים שמקורה בנקודה אחת (הנקב בסריג), ושממנה "נעלמו" האלקטרונים האיטיים ביותר (כדי לשפר את אחידות האנרגיה של הקרן). שינוי פוטנציאל הסריג הראשון מאפשר גם לשלוט על עצמת הקרן.

מול הסריג הראשון נמצא הסריג השני, שגם בו יש נקב. הסריג השני נמצא בפוטנציאל חיובי גבוה (מספר מאות וולטים) ביחס לקתודה, ולכן האלקטרונים שעברו את הסריג הראשון מואצים בדרכם לסריג השני.

האלקטרונים העוברים דרך הנקב שבסריג השני יוצרים את קרן האלקטרונים המואצים, שבה אנו מעוניינים. אולם קרן זו עדיין איננה מרוכזת מספיק לצרכינו, משום שלכל אלקטרון בה יש רכיב מהירות אקראי הניצב לציר השפופרת, ולכן הקרן "מתפזרת". כדי להשיג קרן מרוכזת, אנו מעבירים את האלקטרונים דרך עוד שני גלילי מתכת שבהם נקבים, הנקראים אנודות האנודה הראשונה נמצאת במתח ביניים בין מתח הקתודה לבין מתח הסריג השני, ולכן האלקטרונים מואטים בדרך אליה. האנודה השנייה מחוברת (חיבור פנימי בתוך השפופרת) לסריג השני, והיא מאיצה שוב את האלקטרונים. ההאצה, האטה ושוב האצה של האלקטרונים מרכזות את הקרן, בעזרת עקרון העדשה האלקטרוסטטית שיוסבר בסעיף הבא. כדי למנוע האטה של האלקטרונים אחרי שהם יוצאים מהאנודה השנייה, חייבת האנודה השנייה להיות בפוטנציאל זהה לדפנות השפופרת, ולכן הקתודה, שממנה התחלנו, חייבת להיות בפוטנציאל שלילי ביחס לגוף השפופרת.

המערכת שתוארה עד כה נקראת בשם רובה אלקטרונים, וכפי שראינו, היא יוצרת קרן אחידה מרוכזת של אלקטרונים בעלי אנרגיה גבוהה. רובה האלקטרונים מתואר באופן סכמתי בצירור 5:



מקרא:
 K – קתודה
 G₁ – סריג 1
 G₂ – סריג 2
 A₁ – אנודה 1
 A₂ – אנודה 2
 $V = V_B + V_C$ מתח ההאצה הכולל

ציור 5: רובה האלקטרונים

אם V_C הוא המתח בין הקתודה לבין האנודה הראשונה ו- V_B המתח בין האנודה הראשונה לשנייה, אזי המתח בין שני קצות רובה האלקטרונים הוא $V = V_B + V_C$. מכיוון שאפשר להזניח את האנרגיה הקינטית הקטנה שהייתה לאלקטרונים כשנפלטו מהקתודה, האנרגיה הקינטית של כל אלקטרון היוצא מהרובה שווה למכפלת המטען שלו e , במתח שבין שני קצות הרובה, ולכן:

$$(2) \quad \frac{1}{2}mv_x^2 = eV \Rightarrow v_x = \sqrt{\frac{2eV}{m}}$$

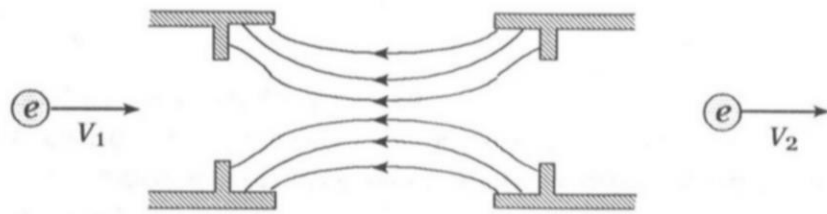
כאשר m היא מסת האלקטרון ו- v_x רכיב המהירות המקביל לציר השפופרת.

האלקטרונים היוצאים מהרובה עוברים דרך שני זוגות של לוחות הטיה הנראים בציור 4. בין שני הלוחות, בכל אחד מהזוגות, קיים מתח המטה את הקרן. לוחות ההטיה האופקית מטים את הקרן ימינה ושמאלה, ולוחות ההטיה האנכית מטים אותה למעלה ולמטה.

לאחר שעברה הקרן את לוחות ההטיה, היא מתקדמת בחלק של השפופרת ההולך ומתרחב, עד שהיא מגיעה למסך. המסך מצופה מבפנים בחומר זרחני, הפולט אור כאשר פוגעים בו אלקטרונים. לכן, במקום בו פוגעת קרן האלקטרונים על המסך מופיעה נקודה מוארת. האלקטרונים המהירים שבקרן קורעים מאטומי החומר הזרחני אלקטרונים שניוניים שחלקם פוגעים בדפנות השפופרת. דפנות השפופרת מצופים מבפנים בשכבת חומר מוליך, כך שהאלקטרונים השניוניים יכולים לנוע אל הקתודה ו"לסגור" את המעגל החשמלי. במתחי האצה נמוכים, זרם האלקטרונים השניוניים איננו מספיק כדי לנטרל את המטען המצטבר על המסך כתוצאה מפגיעת הקרן, והמסך השלילי מסיט את הקרן ממסלולה. העלאת מתח ההאצה מגבירה את זרם האלקטרונים השניוניים ומנטרלת את ההסטה עקב המסך.

עקרון העדשה האלקטרוסטטית

השדה החשמלי הלא-אחיד השורר בין האנודות והסריגים מרכז את הקרן. כדי להבין מדוע, נסתכל לדוגמה בקווי השדה בין האנודה הראשונה לשניה, המתוארים בציור 6.



ציור 6: קווי השדה החשמלי בין האנודות

מכיוון שמטען האלקטרונים שלילי, הכוח הפועל עליהם מנוגד לכיוון קווי השדה. אם קו תנועתו של אלקטרון כלשהו נמצא מעל לציר השפופרת, הוא פוגש בחלק השמאלי של הציור קווי שדה המפעילים עליו כוח ימינה וכלפי מטה. בציר האופקי מואץ אפוא האלקטרון ימינה, ובציר האנכי הוא מקבל כמות קטנה של תנע כלפי מטה. בחלק הימני של הציור, פועל על האלקטרון כוח שכיוונו ימינה וכלפי מעלה, האלקטרון ממשיך אפוא להאיץ ימינה, ומקבל כמות קטנה של תנע כלפי מעלה. מכיוון שמהירות האלקטרון גדלה בינתיים, הוא "מבלה" בחלק הימני פחות זמן מאשר בחלק השמאלי. מתקף הכוח האנכי בחלק הימני קטן אפוא מהמתקף בחלק השמאלי, ולכן התנע שמקבל האלקטרון כלפי מעלה קטן מהתנע שקיבל כלפי מטה. בסך הכל, מקבל האלקטרון תנע נטו כלפי מטה, כלומר כלפי ציר השפופרת. הרווח בין האנודות פועל אם כן באופן אנלוגי ל"עדשה מרכזת" באופטיקה אשר שוברת את קרני האור העוברות דרכה לכיוון הציר שלה.

ברוח שבין הסריג השני לאנודה הראשונה קווי השדה הם הפוכים, אולם אפשר להוכיח שגם הרווח הזה פועל כעדשה מרכזת. תכונות העדשות האלקטרוסטטיות האלו מושפעות מהיחס בין המתחים V_C ו- V_B , וע"י בחירת ערכים מתאימים לשני המתחים אפשר לקבל צירוף עדשות שירכז את הקרן על המסך. בניסוי נקבע את אחד ממתחים אלו ונשנה את השני, עד שנקבל על המסך נקודה קטנה המתאימה לקרן מרוכזת.

חלק ד' - האצה והטיה של אלקטרונים בשדה חשמלי

מבוא

בפרק הקודם דנו במערכת "רובה האלקטרונים" שבשק"ק אשר תפקידה להאיץ את האלקטרונים לכיוון המסך (כיוון z) וליצור אלומה מרוכזת. בצורה זאת נקבל נקודה קטנה ומוארת במרכז המסך. כעת נלמד כיצד ניתן להזיז/להטות את הנקודה הזאת (כלומר את קרן האלקטרונים המרוכזת) ממרכז המסך בכיוונים מעלה-מטה, וימינה-שמאלה. בצורה זו נוכל לתמרן את הנקודה לכל מקום שנרצה על המסך וכך נוכל "לצייר תמונה" על המסך כפי שאנו מכירים מצג הטלוויזיה או המחשב. לצורך כך, קיימים בשק"ק שני סוגים של לוחות הטיה (ראו ציור 4): לוחות הטיה אופקית (Horizontal Deflection Plates) שתפקידם להזיז את קרן האלקטרונים בכיוונים ימינה-שמאלה (ציר x) ולוחות הטיה אנכית (Vertical Deflection Plates) שתפקידם להטות את הקרן בכיוון מעלה-מטה (ציר y). בסעיפים הבאים נלמד את עקרון פעולתם של לוחות אלו.

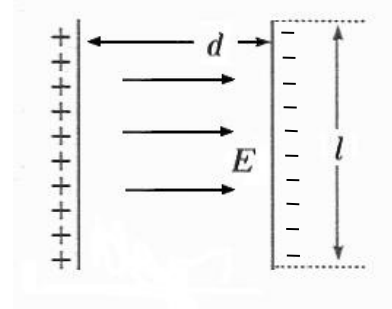
חלקיק טעון בשדה חשמלי

שימוש בנוסחה (1) והנחה שאין שדה מגנטי ($\vec{B} = 0$), מראה כי עוצמת הכוח על אלקטרון בשדה חשמלי היא $\vec{F} = e\vec{E}$. את עצמת השדה החשמלי ($\vec{E}$), השדה החשמלי הוא בעצם הכח הפועל על יחידת מטען חשמלי) מחשבים בעזרת גודל פיזיקלי אחר הנקרא פוטנציאל חשמלי. הפוטנציאל החשמלי $V(x,y,z)$ הוא פונקציה אשר הנגזרת שלה בכוון x תיתן את רכיב השדה החשמלי בכוון x (וכך גם לגבי הרכיבים y ו-z):

$$(3) \quad \frac{\partial V}{\partial x} = -E_x; \quad \frac{\partial V}{\partial y} = -E_y; \quad \frac{\partial V}{\partial z} = -E_z$$

הסימן השלילי נקבע שרירותית ומשמעותו: כיוון השדה הוא מפוטנציאל גבוה לפוטנציאל נמוך. בכדי לקבל שדה חשמלי יש אם כן ליצור הפרש פוטנציאלים, או במילים אחרות מתח חשמלי. (כאשר הפוטנציאל קבוע, הנגזרת שלו מתאפסת).

נסתכל על מערכת פשוטה ליצירת שדה חשמלי: קבל לוחות. כדי לקבל שדה אחיד במרחב נבחר קבל המורכב מלוחות שאורכם ℓ , גדול מאד ביחס למרחק המפריד ביניהם d. קבל כזה מכונה "אינסופי". עובדה ידועה לגבי קבל אינסופי היא שהשדה החשמלי שנוצר בין לוחותיו הוא אחיד.



ציור 7: קבל לוחות

אם הפרש הפוטנציאלים בין הלוחות (כלומר המתח) הינו V_d , ייווצר שדה חשמלי E בין לוחות הקבל שגודלו

$$(4) \quad E = -\frac{V_d}{d}$$

הכיוון של שדה זה יהיה מלוח הקבל הטעון מטען חיובי לכיוון לוח הקבל הטעון מטען שלילי. בשק"ק, השדה החשמלי שבין לוחות ההטיה מטה את קרן האלקטרונים מציר השפופרת. נסתכל לדוגמה בלוחות ההטיה האנכית המתוארים בציור 8 (מבט מהצד): ציר y הוא הציר האנכי וציר z הוא ציר השפופרת. בין שני הלוחות שורר מתח הטיה V_d , שאת ערכו אנו יכולים לקבוע. נניח שהלוח העליון חיובי ביחס לתחתון. שני הלוחות מהווים אפוא מעין קבל. השדה החשמלי בין לוחות של קבל ניתן בקירוב (אם מתעלמים ממה שקורה ליד שולי הקבל (ע"י נוסחה (4).

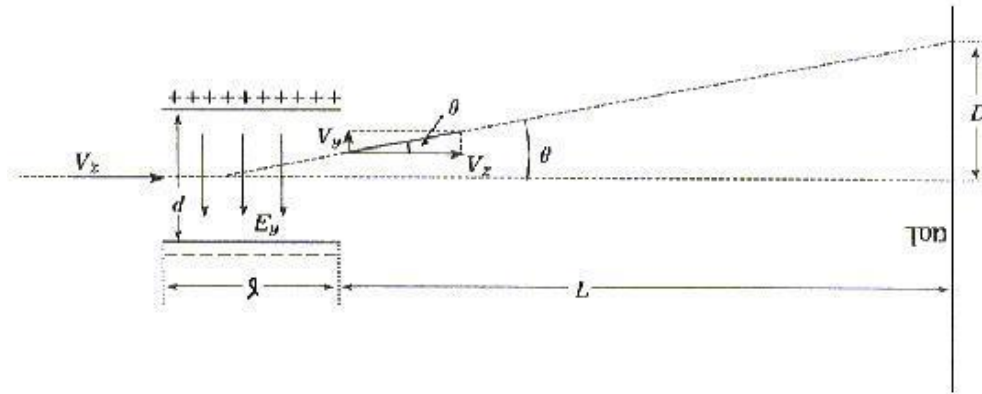
נתבונן עתה בציור 8, אלקטרון נע בכיוון ציר z (הציר האופקי) במהירות קבועה v_z , משמאל לימין. כל עוד מצוי האלקטרון מחוץ ללוחות הקבל, לא פועל עליו כוח כלשהו ולכן מהירותו נשארת קבועה בגודלה ובכיוונה. כאשר נכנס האלקטרון אל בין לוחות הקבל פועל עליו כוח:

$$(5) \quad F_y = -qE_y = -eE_y = \frac{eV_d}{d}$$

מהחוק השני של ניוטון נקבל את התאוצה בכיוון ציר y , a_y :

$$(6) \quad a_y = \frac{F_y}{m_e} = \frac{eV_d}{m_e d}$$

כאשר $m = m_e$ היא מסת האלקטרון.



ציור 8: תנועת אלקטרון בין לוחות קבל

כאשר יצא האלקטרון מבין לוחות הקבל, שוב לא יפעלו עליו כוחות, אולם יהיה לו רכיב מהירות v_y בנוסף למהירות הקבועה v_z . הזווית שבין כוון התנועה שלו וציר z נתונה ע"י הביטוי:

$$(7) \quad \tan(\theta) = \frac{v_y}{v_z}$$

אם ידוע לנו זמן המעוף, t , בין לוחות הקבל, נוכל לחשב את רכיב המהירות v_y של האלקטרון בעת יציאתו מהקבל:

$$(8) \quad v_y = a_y t$$

מאחר שמהירות האלקטרון בכוון z קבועה הרי שהזמן שהוא ששה בין לוחות הקבל נתון ע"י:

$$(9) \quad t = \frac{l}{v_z}$$

כאשר l – אורך הלוחות, ולכן:

$$(10) \quad \tan(\theta) = \frac{v_y}{v_z} = \frac{a_y l}{v_z^2} = \frac{eV_d l}{mv_z^2 d}$$

הגודל mv_z^2 שמופיע במכנה שווה לפעמיים האנרגיה הקינטית שהייתה לאלקטרון בעת היכנסו אל בין לוחות הקבל. נותר לנו, לפיכך, לברר מנין השיג האלקטרון אנרגיה זו. אחת

הדרכים להביא אלקטרון ממצב מנוחה למצב של תנועה במהירות קבועה היא להפעיל עליו מתח האצה V . לאלקטרון אשר מואץ בהשפעת מתח כזה מתווספת אנרגיה קינטית בשיעור:

$$(11) \quad eV = \frac{mv_z^2}{2}$$

ולכן, בהנחה שהאלקטרון צבר את האנרגיה הקינטית שלו ע"י האצה במפל פוטנציאליים V , אפשר לרשום:

$$(12) \quad v_z^2 = \frac{2eV}{m}$$

$$(13) \quad \tan(\theta) = \frac{V_d l}{2Vd}$$

אנו רואים שהזווית θ אינה תלויה ב- e או ב- m של החלקיקים (כלומר חלקיק אחר בעל מטען זהה אך מסה שונה, למשל יון Cl^- , היה יוצא מהקבל באותה זווית).

הטיה חשמלית של קרן אלקטרונים בשק"ק

נחשב עתה את מידת הסטייה של קרן האלקטרונים ממרכז המסך הנגרמת כתוצאה מהפעלת מתח בין לוחות ההטיה. אם L הוא המרחק בין לוחות ההטיה לבין המסך, ו- ℓ הוא אורך הלוחות, אזי $L + \ell/2$ הוא המרחק בין מרכז לוחות ההטיה למסך, והמרחק D בין נקודות הפגיעה של הקרן במסך לבין מרכז המסך הוא (ראה ציור 8):

$$(14) \quad D = (L + \ell/2) \tan(\theta) = \frac{(L + \ell/2)lV_d}{2dV}$$

כאשר השתמשנו בנוסחת ההטיה (13). האלקטרונים נעים לאורך הקו המשיק לפרבולה, ואפשר להוכיח (בעזרת גיאומטריה אנליטית) שהמשיק חוצה את ציר השפופרת בדיוק בנקודה הנמצאת בין מרכזי הלוחות.

כאשר מתח ההטיה V_d שלילי, כלומר כאשר הלוח התחתון חיובי ביחס לעליון, מתקבל מנוסחה (14) ערך שלילי עבור D שמשמעותו שההטיה היא כלפי מטה. לוחות ההטיה האופקית פועלים באופן דומה (שימו לב ש- d, ℓ ו- L שונים עבור לוחות אלו).

חלק ה' - הטיה של אלקטרונים בשדה מגנטי

חלקיק טעון בשדה מגנטי

כזכור נוסחה (1) היא $\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$. עתה נדון במקרה בו קיים רק שדה מגנטי, $\vec{E} = 0$. העבודה ליחידת זמן שמבצע כוח על חלקיק, או במילים אחרות, ההספק שלו ניתן ע"י:

$$(15) \quad \text{הספק} = \vec{F} \cdot \vec{v}$$

הכוח המגנטי ניצב תמיד לכיוון המהירות $\vec{v}$ וכתוצאה מכך המכפלה הסקלרית בינו ובין המהירות שווה לאפס והוא אינו מבצע עבודה על החלקיק:

$$(16) \quad \vec{F} \cdot \vec{v} = q(\vec{v} \times \vec{B}) \cdot \vec{v} = 0$$

משמעות הדבר היא שמהירותו של האלקטרון אינה משנה את גודלה (כוון וקטור המהירות, $\vec{v}$, כן משתנה) ולכן גם האנרגיה הקינטית, שתלויה רק בגודל של $\vec{v}$, נשארת קבועה.

אם בין וקטור המהירות $\vec{v}$ ווקטור השדה המגנטי $\vec{B}$ ישנה זווית θ , הרי גודלו של הכוח שיפעל על האלקטרון הוא:

$$(17) \quad |\vec{F}| = evB \sin(\theta)$$

במקרה הפשוט של תנועה במיבב לכיוון השדה: $\theta = \pi/2$, ואז:

$$(18) \quad F = evB$$

הכוח F גורם לתאוצה שכיוונה ניצב לכיוון מהירות האלקטרון ולכן האלקטרון ינוע בתנועה מעגלית. ידוע לנו ממכניקה שבתנועה מעגלית מתקיים:

$$(19) \quad F = \frac{mv^2}{R} = evB \Rightarrow R = \frac{mv}{eB}$$

כאשר R - רדיוס המעגל, ו- $\vec{v}$ - המהירות (המשיקית).

התדירות הזוויתית ω נתונה ע"י:

$$(20) \quad \omega = \frac{v}{R}$$

ולכן

$$(21) \quad F = m\omega^2 R$$

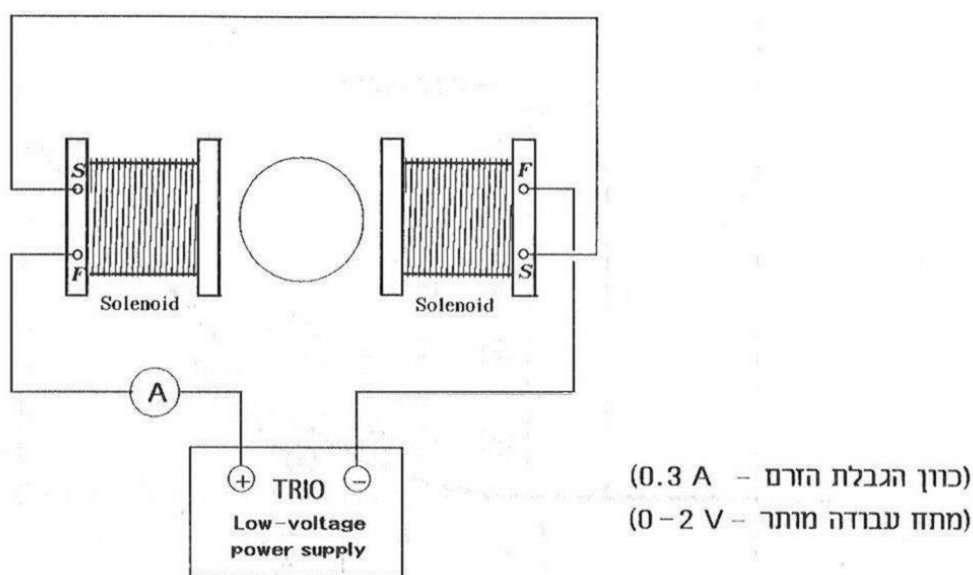
נשווה בין שני הביטויים ל-F ונקבל:

$$(22) \quad \omega_c = \frac{eB}{m}$$

זוהי תדירות הציקלוטרון: תדירות המאפיינת תנועה מעגלית של חלקיק טעון בשדה מגנטי. היא אינה תלויה במהירות החלקיק ולכן כשמהירות החלקיק גדלה גדל גם רדיוס הסיבוב. עבור שדה מגנטי ידוע, B, ניתן לחשב, על פי ω_c את היחס e/m שהוא גודל פיסיקלי בסיסי.

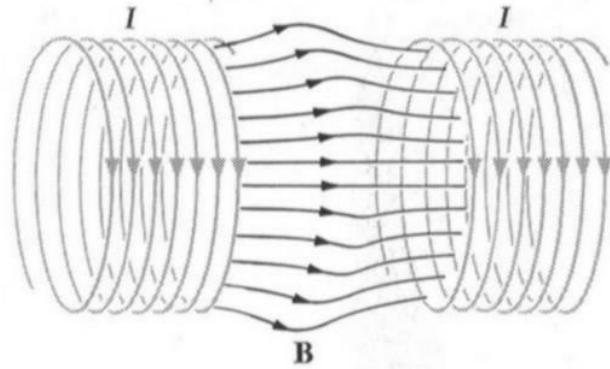
הטיה מגנטית של קרן אלקטרונים בשק"ק

בניסוי נשתמש בקרן אלקטרונים של השק"ק, וניצור את השדה המגנטי בעזרת שני סלילים משני צדי השק"ק, כמו בציור 9 (מבט מלפנים; השפופרת מיוצגת ע"י העיגול הגדול במרכז). יש להקפיד לעבוד לפי הגבלת הזרם ומתח העבודה הנתונים במעבדה.

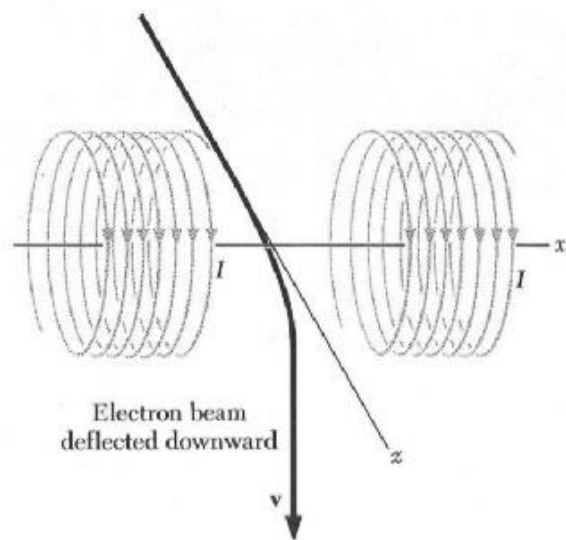


ציור 9: מערכת ההטיה המגנטית (תיאור סכמטי)

מכיוון שאפשר לראות את שני הסלילים כחלק מסליל אינסופי, נוצר בתוכם שדה מגנטי הנראה בציור 10. השדה הוא אופקי, וכיוונו מאונך לציר השפופרת. כאשר אלקטרון הנע על ציר השפופרת מגיע אל הרווח שבין הסלילים, מטה אותו השדה המגנטי ממסלולו, כמו בציור 11. ההטיה היא כלפי מטה (כבציור) או כלפי מעלה, בהתאם לכיוון הזרם שבסלילים.

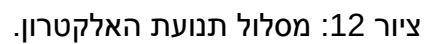


ציור 10: שדה בין סלילים.



ציור 11: הטיה בין סלילים.

כפי שרואים מציור 10, השדה בין הסלילים איננו אחיד, וקשה מאד לחשב את מסלול תנועת האלקטרון בשדה כזה. נשתמש אפוא בקירוב: נניח שהשדה המגנטי שווה לערך קבוע B בתחום האורך $2a$ מסביב למרכז השפופרת, ואפס מחוץ לתחום זה. אם L הוא אורך השפופרת (מהאנודה השניה למסך), השדה B קיים אפוא בתחום שבין $L/2 - a$ לבין $L/2 + a$ לאורך ציר z (ציר שפופרת). מסלול תנועת האלקטרון מתואר בקו עבה בציור 12 (מבט מהצד).


$$(23) \quad \sin \theta \approx \tan \theta \approx \theta; \cos \theta \approx 1 - \frac{\theta^2}{2}$$
$$(24) \quad y_0 = r - AB = r[1 - \cos \theta] \approx \frac{r\theta^2}{2}$$
$$(25) \quad 2a = BC = r \sin \theta \Rightarrow \frac{2a}{r} = \sin \theta \approx \tan \theta \approx \theta$$

עמוד 16 מתוך 20

$$(26) \quad D = y_0 + \left(\frac{L}{2} - a\right) \tan \theta \approx r \frac{\theta^2}{2} + \left(\frac{L}{2} - a\right) \tan \theta \approx$$

$$\frac{r}{2} \left(\frac{2a}{r}\right)^2 + \left(\frac{L}{2} - a\right) \frac{2a}{r} = \frac{2a^2}{r} + \frac{La}{r} - \frac{2a^2}{r} = \frac{La}{r}$$

נציב את z מנוסחה (19) ונקבל

$$(27) \quad D = LaB \frac{e}{mv_{\perp}} = LaB \frac{e}{m \sqrt{\frac{2eV}{m}}} = \sqrt{\frac{e}{m}} La \frac{B}{\sqrt{2V}}$$

כאשר גודל מהירות האלקטרון $v_{\perp} = \sqrt{\frac{2eV}{m}}$ [נוסחה (12)]. כעת עלינו להעריך את גודלו

האפקטיבי של B . כפי שאפשר לראות מציור 9, השדה המגנטי קיים גם מחוץ לרווח בין הסלילים, ולכן אי אפשר לקחת a - את רדיוס הסלילים. נניח אפוא ש- a שווה לחלק מסוים של מחצית אורך השפופרת, כלומר למספר כלשהו K_1 כפול $L/2$. K_1 קטן מאחד, אולם לא בהרבה (כלומר לא ייתכן, למשל, ש- K_1 שווה אחד חלקי מיליון).

$$(28) \quad D = K_1 \sqrt{\frac{e}{m}} \frac{L^2}{2\sqrt{2}\sqrt{V}}$$

כעת ננסה להעריך את B . השדה המגנטי B_0 לאורך ציר של סליל בעל אורך אינסופי, שזורם בזרם I הוא

$$(29) \quad B_0 = \mu_0 nI$$

כאשר n הוא מספר הכריכות ליחידת אורך של הסליל. כוון השדה הוא לאורך ציר הסליל. הקבוע μ_0 נקרא בשם פרמאביליות (חלחלות) של הוואקום וערכו שווה ביחידות MKS ל-

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \frac{\text{Weber}}{\text{amp} \cdot \text{m}}$$

כיוון ששני הסלילים מהווים רק חלק מסליל אינסופי, השדה שהם יוצרים קטן מהשדה הנקבע על פי נוסחה (29). כמו כן, נוסחה (29) מתארת את השדה לאורך ציר הסלילים, ומחוץ לציר הסלילים השדה חלש עוד יותר.

נניח אפוא שערכו האפקטיבי של B בנוסחה (28) שווה לקבוע כלשהו K_2 (גם K_2 קטן מאחד) כפול השדה B_0 של נוסחה (29)

$$(30) \quad B = K_2 \mu_0 n I$$

נציב את נוסחה (30) בתוך נוסחה (28), נסמן $K = K_1 K_2$ ונקבל

$$(31) \quad D = K \mu_0 \sqrt{\frac{e}{m}} \frac{L^2 n I}{2\sqrt{2}\sqrt{V}}$$

כאשר ברור ש- K קבוע כלשהו, קטן מאוד. הקירובים הגסים (של המקדמים K_1 ו- K_2) יכולים לעורר ספקות באשר לנכונות התוצאה הסופית שבנוסחה (31) אולם לצרכינו נוסחה (31) מדויקת מספיק. הסיבה לכך היא שגם עבור שדה לא-אחיד, כמו זה הנוצר ע"י הסלילים, גודל התזוזה האנכית D פרופורציוני לעוצמת השדה המגנטי, כלומר לזרם בסלילים I . את התלות במתח ההאצה V קיבלנו מנוסחה (19) בלי שום קירובים, ולכן D חייב להיות פרופורציוני לזרם בסלילים חלקי שורש מתח ההאצה. בדיוק כפי שקובעת נוסחה (31). מכיוון שבניסוי נבדוק רק את התלות של D ב- I וב- V , נוכל להשתמש בנוסחה (31) ולצפות שנקבל ערך סביר עבור K . יש לזכור שבנוסחה (23) עשינו עוד קירוב כשהנחנו שהזווית θ קטנה אולם בניסוי שלנו קירוב זה הוא מספיק לצרכינו.

חלק ו' – סיכום

סיכום הטיה בשדה חשמלי

למעבדה יש להגיע עם פתרון השאלה הבאה:

- מצאו תחום ערכים סביר (חסם תחתון וחסם עליון) ליחס ℓ/d של לוחות ההטיה האופקית (אלו הלוחות הקרובים ביותר למסך).

לעזרה ניתן לפנות לאתר האינטרנט של המעבדה בסעיף "אז מהו היחס בין ℓ ל- d "

במעבדה נקבע את מקום הקרן על המסך כאשר מתח ההטיה $V_d = 0$, ונבצע סדרת מדידות של D (סטיית הקרן מנקודה זו) עבור מתחי הטיה חיוביים ושליילים. בזמן מדידה זאת $V = V_B + V_C$ נשאר קבוע.

נמקד את הקרן על המסך עבור ערך אחר של מתח ההאצה V ונבצע מדידות נוספות של D ו- V_d . נחזור על המדידות עבור מספר ערכים של V ונרכז את תוצאות המדידות בטבלה.

עבור כל אחד מערכי V נשרטט גרף של D כפונקציה של V_d . נבדוק האם נקבל קווים ישרים וכן נחשב את יחס שיפועי הקווים ונשווה ליחס התאורטי שהם צריכים לקיים. בעזרת כל הנתונים נשרטט גרף של D כפונקציה של V_d/V . מערך השיפוע נחשב את הגודל הקשור במימדי השק"ק ℓ/d ונשווה לגודל המדוד ישירות בתרשים הסכמטי של מבנה השק"ק.

סיכום הטיה בשדה מגנטי

במעבדה נמדוד את הטיית קרן האלקטרונים בשק"ק כפונקציה של הזרם בסלילים. נחזור על המדידות עבור קוטביות הפוכה של הסלילים. נשרטט גרף של ההטיה כפונקציה של $I/\sqrt{V}$ (I הזרם בסלילים, V מתח ההאצה).

נחזור על המדידות עבור ערך נוסף של מתח האצה ונוסיף את הנתונים החדשים לגרף הקודם. נבדוק האם מתקבלים קווים ישרים והאם הם מקיימים את היחס התאורטי הצפוי.

כקרוב ראשון, נניח כי השדה שיצרו הסלילים שווה לשדה של סליל אינסופי בעל אותה צפיפות של כריכות. מתוך הנחה זו ומשיפוע הגרף נמצא את היחס e/m . כעת נבדוק עד כמה שגויה הייתה ההנחה שהנחנו. נשתמש בערך של e/m מן הספרות ובשיפוע הגרף, כדי

לחשב את היחס בין שדה של סליל אינסופי ובין השדה האפקטיבי שהרגישו האלקטרונים בניסוי, כלומר להעריך את K.