



הרשות לקהילה ולנוער
The Authority For The
Community And Youth

המחלקה לפיתוח אמצעי הוראה, נוער שוחר מדע ורעיון
האוניברסיטה העברית בירושלים

ש. רובינשטיין

ציוד מדעי בע"מ. טלפון: 04-8576667

ניסוי e/m למדידת היחס בין מטען האלקטרון

למסת האלקטרון

מהדורה ניסיונית ראשונה

גלעד אור

© כל הזכויות שמורות 2005 לנוער שוחר מדע

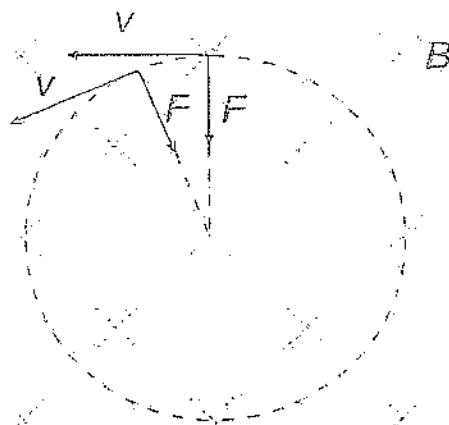
האוניברסיטה העברית בירושלים

תוכן העניינים

- 1..... תוכן העניינים
 - 2..... מבוא
 - 5..... חישוב ערך e/m מנתנועתם המעגלית של האלקטרונים
 - 7..... המערכת הניסויית
 - 8..... פירוט מרכיבי המערכת
 - 10..... מהלך הניסוי
 - 11..... עיבוד נתונים והסקת מסקנות
-
-
-

מבוא

בסוף המאה ה-19 ובתחילת המאה ה-20 נערכו מספר ניסויים שהובילו להבנה מעמיקה יותר של החומר, שני ניסויים מרכזיים אפשרו את אפיון האלקטרון. ניסוי ראשון שנערך על ידי J.J Thomson ב-1897, מדד את היחס בין מטען האלקטרון למסתו על ידי התבוננות בתנועת האלקטרון בשדות חשמליים ומגנטיים. הניסוי השני, שנערך על ידי R.A Millikan ב-1909, קבע את מטען האלקטרון על ידי התבוננות בתנועתו בשדה חשמלי. דומפסון התבסס על משוואת לורנץ המתארת את הכוח המופעל על חלקיק טעון הנע בשדה חשמלי ומגנטי. לכוה זה שני רכיבים: רכיב הנוצר על גבי המטען כתוצאה משדה חשמלי ורכיב הנוצר כתוצאה משדה מגנטי. הסכום הוקטורי של שני הרכיבים הוא כוח לורנץ. הכוח המופעל על חלקיק טעון העובר בשדה מגנטי ניצב תמיד לכיוון השדה ולכיוון ההתקדמות שלו, לפיכך, חלקיק טעון הנע בשדה מגנטי ינוע בתנועה מעגלית. איור 1 מודגים את כיוון הכוח הפועל על חלקיק טעון הנע בשדה מגנטי.



איור 1: הכוח הפועל על מטען הנע במצב לשדה מגנטי. ה-Xים מסמנים כי כיוון השדה המגנטי הוא לתוך הדף ובניצב אליו.

מכון ויצמן למדע
 ת.ד. 263, מיקוד 30200
 רב קריה 04-6576667

הכוח הפועל על החלקיק הנע בשדה מגנטי ניתן על ידי נוסחת לורנץ:

$$(1) \quad F = qvB$$

F שהיא כוח צנטריפטלי (לכיוון המרכז) הפועל על החלקיק הטעון, q מטען החלקיק, v מהירות החלקיק ו- B עוצמת השדה המגנטי. כוח זה שווה בגודלו לכוח הצנטריפטלי mv^2/r (תנועה מעגלית) בו m היא מסת החלקיק, v מהירות החלקיק ו- r רדיוס התנועה המעגלית. לפיכך

$$(2) \quad qvB = mv^2/r$$

צמצום וסילור מהדש של משוואה (2) מניביאת היהם בין המטען לנכסתו

ש. הובלינסקי

ייצור יזמא השיחק עיקר מדעי
קרן היטור 5, טיידת הכרמל
ו.ד. 263, מיקוד 30200
רב קורי 09-8576667



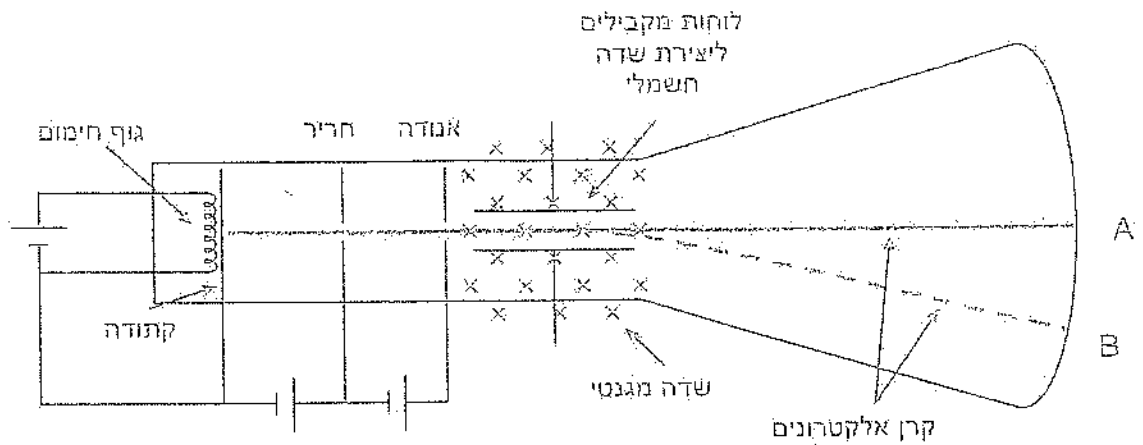
(3)
$$\frac{q}{m} = \frac{v}{rB}$$

נדון עתה בכוח הפועל על חלקיק טעון הנמצא בשדה חשמלי. כוח זה יפעל בכון השדה החשמלי ויהיה תלוי בסיימנו של המטען. הכוח נתון על ידי

(4)
$$F = qE$$

F הוא הכוח שנוצר כתוצאה מהשדה החשמלי, q מטען החלקיק ו- E היא עוצמת השדה החשמלי. כפי שצויין הכוחות הנובעים מהשדה החשמלי והמגנטי הם שני רכיבים וקטוריים של כוח לורנץ. תומפסון ניצל עובדה זו ובנה מערכת בה שני הכוחות מקבילים זה לזה אך מנוגדים בכיונם. על ידי שינוי עוצמת השדה המגנטי או החשמלי ניתן היה לאפס את כוח לורנץ. תומפסון השתמש במערכת כדוגמת זו המתוארת באיור 2. קרן אלקטרונים נוצרת בשפופרת ריק על ידי חימום הקתודה באמצעות גוף חימום. הקתודה המוחזמת פולטת אלקטרונים המואצים על ידי השדה החשמלי הקיים בין האנודה והקתודה. במסלול האלקטרונים קיים חריר הנמצא במתח חיובי ביחס לקתודה אך שלילי ביחס לאנודה הגורם למיקוד הקרן. האלקטרונים המואצים יוצאים בצורת קרן דרך חריר נוסף הנמצא באנודה. יש לציין כי בתקופה בה נערך הניסוי לא היו ידועות תכונות הקרן ולפיכך היא כונתה קרן קתודה (כי היא נבעה מהקתודה) ושפופרות מסוג זה נקראו שפופרות קרן קתודה. המכלול היוצר את קרן האלקטרונים ידוע גם כמותח אלקטרונים. תומפסון העביר את הקרן דרך שדה מגנטי ושדה חשמלי (הנוצר על ידי הפעלת מתח על שני לוחות מקבילים) הניצבים זה לזה. בהעדר שדה מגנטי וחשמלי ממשיכה הקרן ישר, פוגעת בזכוכית במקודה A ויוצרת פליטה של אור ירוק.

1 למעשה שפופרות הטלוויזיה הנפוצות כיום פועלות בדומה למערכת תומפסון והשפופרת נקראת שפופרת קרן קתודה (CRT Cathode Ray Tubes)



איור 2: מערכת הניסוי של תומפסון.

עם הפעלת השדה המגנטי מוסטת הקרן במקודה B, כתוצאה מכוח לורנץ הניצב לשדה המגנטי ולכיוון התקדמות החלקיקים בקרן. מהעבודה כג. הכוח הפועל על הקרן הוא שלילי (הקרן נעה כלפי-מטה) - הסיק תומפסון כי קרני הקתודה מכילים חלקיקים בעלי מטען שלילי. תומפסון הפעיל שדה חשמלי בניצב לשדה המגנטי ולקרן הקתודה. הוא כוון את השדה כך שכוח לורנץ הנובע מהשדה החשמלי שונה לרכיב הנובע מהשדה המגנטי והפוך לו בכיוונו. ניתן היה לזהות מצב זה מכיוון שהקרן חזרה לפגוע במקודה A. במצב בו קיים שוויון בין הכוחות מתקיים $qE = qvB$ ולכן,

(5)

$$v = \frac{E}{B}$$

ע. רוזינשטיין
 ייצור יבוא ושיפוץ ציוד מדעי
 קרו היסוד 5, טירת הכרמל
 ת.ד. 265, מיקוד 30200
 רב קווי 04-8576667

אם כן, מידיעת עוצמת השדה החשמלי ועוצמת השדה המגנטי ניתן לחשב את מהירות החלקיקים בקרן הקתודה. על ידי הצבת היחס ביניהם במשוואה 3 מתקבלת דרך למדידת היחס בין המטען של החלקיק למסתו

(6)

$$\frac{q}{m} = \frac{v}{rB^2}$$

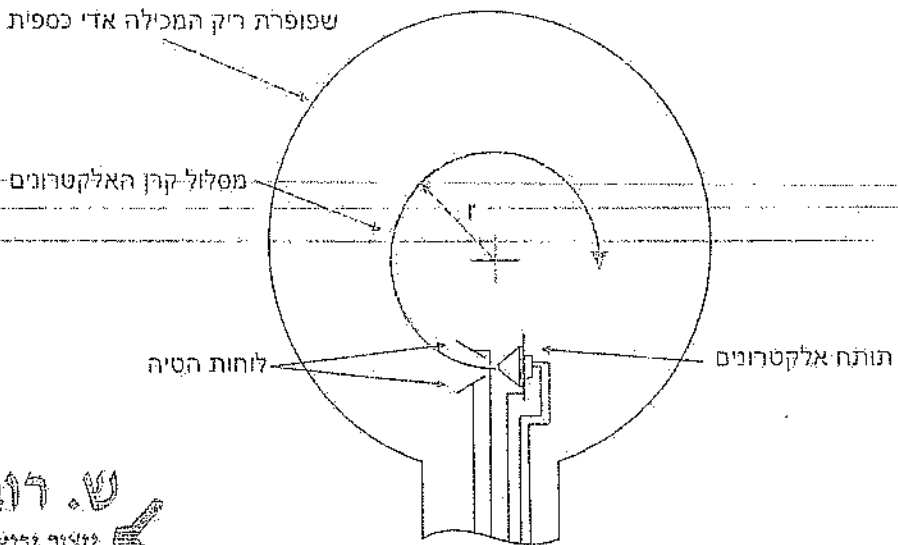
12. שנים מאוחר יותר, הצליח רוברט מיליקן למדוד את מטען האלקטרון ואפשר בכך את חישוב ערכה של מסת האלקטרון. הערכים של מטען האלקטרון ומסת האלקטרון כפי שידועים לנו כיום הם:

$$e = 1.6021773 \times 10^{-19} \text{ C}$$

$$m = 9.109390 \times 10^{-31} \text{ kg}$$

חישוב ערך m/e מתנועתם המעגלית של האלקטרונים

שפופרת הניסוי המשמשת בניסוי זה שונה משפופרת הניסוי הקלסית של תומפסון. לשפופרת הריק מבנה כדורי ומבסיסה יוצאים תותח אלקטרונים ושני לוחות הטיה. אלה מחוברים מן הבסיס לספק מתח נמוך הדרוש לגוף החימום הנמצא בתוך תותח האלקטרונים, ושני ספקי מתח גבוה נפרדים הנדרשים להפעלה של תותח האלקטרונים ולוחות ההטיה. איור 3 מתאר את שפופרת הניסוי.



ע. רובינשטיין
 ייצור מכונות זשייזוק ציוד מדיעי
 קרן היסוד 5, טירת הכרמל
 ת.ד. 263, מיקוד 30200
 רב קרוי 04-8578667

קרן האלקטרונים אינה נראית לעין, אולם, שפופרת הריק מכילה אדי כספית וכאשר אלקטרונים בעלי אנרגיה הגבוהה מ- 10.4 eV , מתנגשים אחוז קטן מהאלקטרונים, עם אטומי הכספית. כתוצאה מההתנגשות, חלק מהאטומים מתיינן וחלק מעוררי. רוב אטומי הכספית חוזר למצב הבלתי מעורר או מחזיר לעצמו את האלקטרון (וחוזר להיות ניטרלי) במהירות, במרחק קטן מאזור ההתנגשות ונתון כדי כך פולטים אור בצבע טורקיז. תופעה זו מסמנת את המסלול של קרן האלקטרונים. ללא שדה מגנטי וללא שדה חשמלי הקרן ממשיכה במסלול ישר ופוגעת בדופן השפופרת. ברגע שמפעילים את השדה המגנטי, כפי שתואר לעיל, פועל על הקרן כוח צנטריפטלי והאלקטרונים ינועו בתנועה מעגלית. רדיוס מסלול האלקטרונים ישתנה בהתאם לעוצמת השדה המגנטי. עם הגדלת עוצמת השדה המגנטי יקטן רדיוס מסלול האלקטרונים.

עתה, נחשב את היחס בין מטען האלקטרון למסתו במערכת הניסוי. הפרש הפוטנציאלים V בין הקתודה לאנודה מאיץ את האלקטרונים הנפלטים כתוצאה מחימום הקתודה. אלקטרונים אלה יוצאים מהתותח עם אנרגיה קינטית השווה לאנרגיה החשמלית

- 2 כתוצאה מההתנגשות אחד מהאלקטרונים נעקר מהאטום.
- 3 האלקטרון עובר ממסלול נמוך יותר למסלול גבוה יותר.
- 4 פליטה של אלקטרונים הנובעת מחימום נקראת פליטה תרמויונית.

$$(7) \quad \frac{1}{2}mv^2 = Ve$$


בהנחה כי האנרגיה שקיבל האלקטרון כתוצאה מחימום הקתודה זניחה ביחס לאנרגיה החשמלית. בתנאי שקרן האלקטרונים נוצרת לשדה המגנטי, הכוח הפועל על האלקטרונים הנובע מהשדה מתואר על ידי הרכיב המגנטי של כוח לורנץ $F = evB$ הגורם לתנועה מעגלית של האלקטרונים ומספק את הכוח הצנטריפטלי

$$(8) \quad mv^2/r = evB$$

על ידי בידוד v^2 במשוואה 7 והצבתו במשוואה 8 ניתן להגיע ליחס

$$(9) \quad e/m = \frac{2V}{B^2 r^2}$$

ש. רוזינסטיין
 ייצור פנא ושיווק ציוד מדעי
 קרן היסוד 5, טירת הכרמל
 ת.ד. 263, מיקוד 30200
 רב קווי 04-8576667



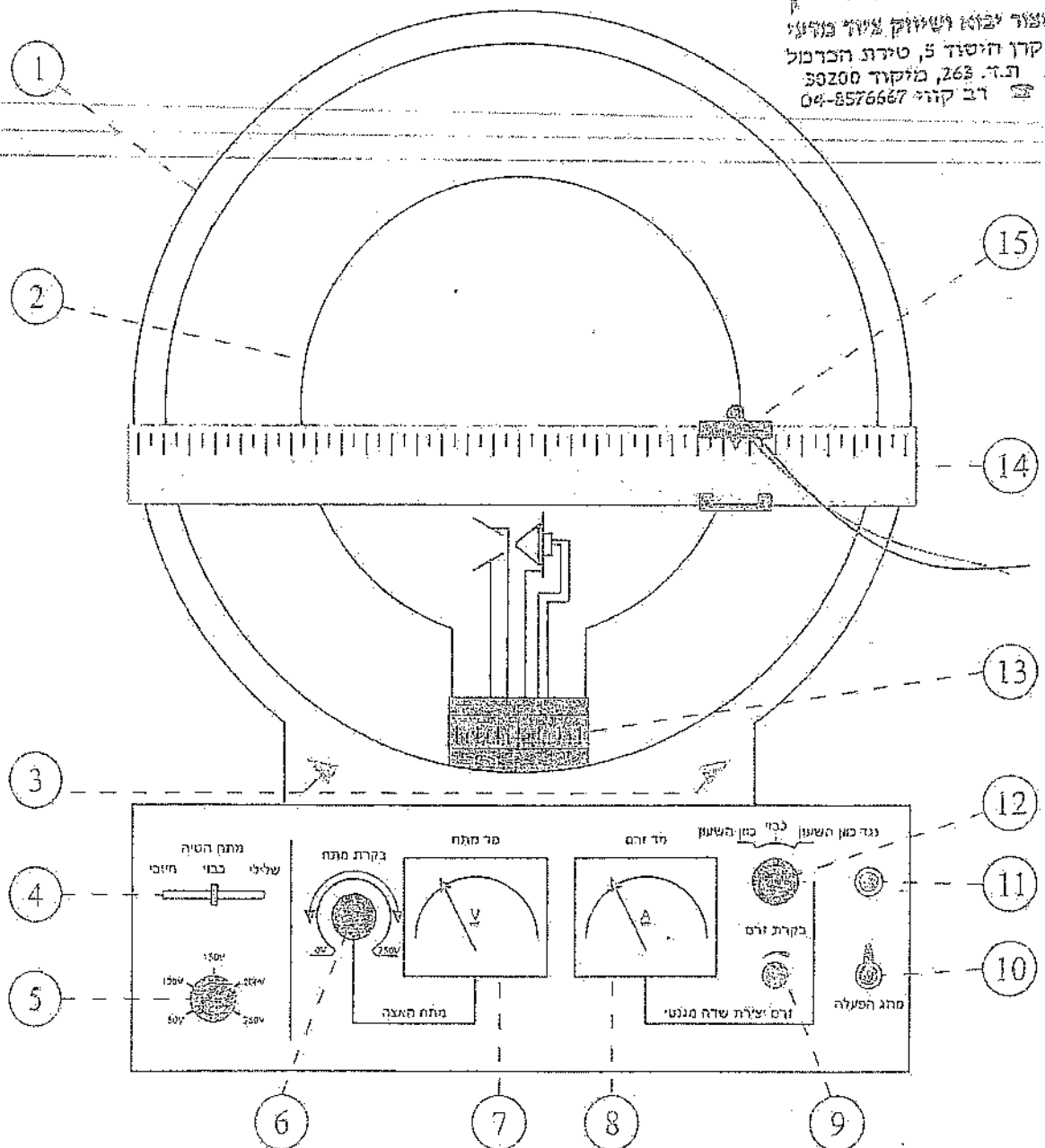
מכאן שניתן לחשב את יחס מסען האלקטרון למסתו ממתח ההאצה V מעוצמת השדה המגנטי B ומרדיוס המעגל בו נעים האלקטרונים בשדה המגנטי r .

לוחות ההסיה אינם מקבילים ולפיכך השדה החשמלי בהם אינו אחיד ולא ניתן לבצע במערכת את הניסוי כפי שבוצע במקור על ידי תומפסון. הטיית הלוחות מאפשרים לקרן האלקטרונים לבצע תנועה מעגלית. לוחות ההסיה מיועדים להדגים את ההסיה של קרן אלקטרונים באמצעות שדה חשמלי.

המערכת הניסויית

המערכת הניסויית העומדת לרשותכם בניסוי מתוארת באיור 4. בבסיס המערכת קיימים ספקי המתח הגבוה הדרושים להאצת האלקטרונים בתותח האלקטרונים ולהטיית קרן האלקטרונים באמצעות לוחות ההטייה. בבסיס המערכת קיימים גם ספק מתח הדרוש להפעלת גוף החימום בתוך תותח האלקטרונים, וספק זרם הדרוש ליצירת השדה המגנטי באמצעות זוג סלילי הלמהולץ. בחזית המערכת ממוקמים צפתורי הבקרה שיפוארו בהמשך, מד-זרם המודד את הזרם החשמלי העובר דרך הסלילים ומד-מתח המודד את מתח ההאצה בתוך תותח האלקטרונים.

ש. רובינשטיין
 יוצר לבוא ושיחוק ציוד מדעי
 קרן היסוד 5, טירת הכרמל
 ת.ד. 263, מלקוד 50200
 ד"ר קודי 04-8576667



איור 4: מערכת הניסוי המוכללת למדידת היחס בין מסען האלקטרון למסתו

פיחש מרכיבי המערכת.

סליל הלמהולץ ① – מורכב משני סלילים הנמצאים על אותו ציר, בעלי 160 ליפופים כל אחד והמרוחקים אחד מהאחר מרחק של רדיוס הסליל (13.9 ס"מ). מנתונים אלו ניתן לחשב את עוצמת השדה שהוא מתקנתו לזרם $B=10^{-3} T$. יתרוצם של סלילי הלמהולץ נעוץ בכך שבמרכז המרחב ביניהם הם משרים שדה מגנטי אחיד למדי.

שפופרת e/m עם לוחות הטיה ② – שפופרת ריק המכילה אדי כספית תותח אלקטרונים ולוחות הטיה. נודית חיוני לסימון כיוון זרימת הזרם החשמלי ③ – נודית חיוני בצורת חץ המסמנת את כוון זרימת הזרם החשמלי.

בוור מתח ההטיה ④ – לבורר שלושה מצבים: כבוי, שלילי וחיצוי. הבורר מחבר ומנתק את מקור המתח וקבוע את כוון (כוון השדה).

⚠ בזמן הדלקת המערכת יש לוודא כי בוור מתח ההטיה ④ נמצא במצב כבוי.

בקרת עוצמת מתח ההטיה ⑤ – מאפשר שליטה על עוצמת מתח ההטיה בין 0V ל-250V. יש לשים לב כי השדה בין הלוחות אינו אחיד.

⚠ בזמן הדלקת המערכת ובזמן שינוי כוון או הפעלה בבורר מתח ההטיה ④ יש לסובב את בקרת עוצמת ההטיה ⑤ נגד כוון השעון עד שהוא נעצר.

כפתור בקרת מתח ההאצה ⑥ – שולט על המתח בין הקתודה לאנודה בתותח האלקטרונים. במתח המספק לאלקטרונים אנרגיה קינטית הקטנה מ-10.4eV האלקטרונים לא יעוררו את אטומי הכספית ולא ניתן יהיה לראות את מסלולם. הגדלת מתח ההאצה מגדילה את האנרגיה הקינטית ומגבירה לפיכך את עוצמת ההארה של קרן האלקטרונים.

⚠ בזמן הדלקת המערכת יש לסובב את כפתור בקרת מתח ההאצה ⑥ כנגד כוון השעון עד שנעצר.

מד-מתח ⑦ – מודד את מתח ההאצה בין האנודה לקתודה בתותח האלקטרונים.

מד-זרם ⑧ – מודד את בסלילים. עוצמת השדה המגנטי פרופורציונית לזרם בסלילים.

כפתור בקרת זרם ⑨ – שולט על עוצמת הזרם בסלילים.

⚠ בזמן הדלקת המערכת או בזמן שינוי המצב של בוור כיוון הזרם ⑨, יש לסובב את כפתור בקרת הזרם ⑨ נגד כוון השעון עד שנעצר.

מד-זרם ⑩ – מדד הזרם בסלילים.

מד-מתח ⑪ – מדד המתח ההאצה.

מד-זרם ⑫ – מדד הזרם בסלילים.

בוור כוון הזרם ⑫ – לבורר שלושה מצבים: כבוי, עם כוון השעון ולנגד כוון השעון. בוור זה מפעיל ומכבה את הזרם בסלילים ובאמצעותו ניתן לקבוע את כיוון הזרם ועל ידי כך גם את כיוון השדה המגנטי.

ע. רובינשטיין

יצור יצוא ושיווק ציוד מדעי
קרן היסוד 5, טירת חכרמל
ת.ד. 263, מיקוד 30200
רב קווי 04-8576667



Δ בזמן הדלקת המערכת יש לוודא כי בורר כוון הזרם ⑫ נמצא במצב כבוי.

מד-זווית ושפופרת e/m ⑬ – את השפופרת ניתן לסובב בין 0° ל- 180° . לצורך הניסויים תמיד נציב את קרן האלקטרונים בניצב לשדה המגנטי. ההצבה נעשית על ידי פתיחת הבורג הנמצא בצד הימני של תושבת השפופרת וניבוב השפופרת כך שמד-הזווית יורה על 90° .

Δ בתום השימוש במערכת יש לסובב את התושבת ל- 0° ולהבריג את בורג בעלת התושבת.

סרגל מדידת קוטר מסלול קרן האלקטרונים ⑭ עם כוונת מוארת ⑮ – את קוטר מסלול הקרן מודדים בין שתי הקצוות האופקיים של העיגול. המדידה מתבצעת בעזרת מראה אחורית בגובה הסרגל והכוונת שעל גביה.

מדליקים את הנרית האדומה שעל הכוונת ומניחים את הכוונת על גבי הסרגל תוך הסתכלות מבעד למגרעת ומכוונים כך שאחד מהקצוות האופקיים של מסלול הקרן, הכוונת והנקודה המוארת במראה נמצאים בקו אחד.

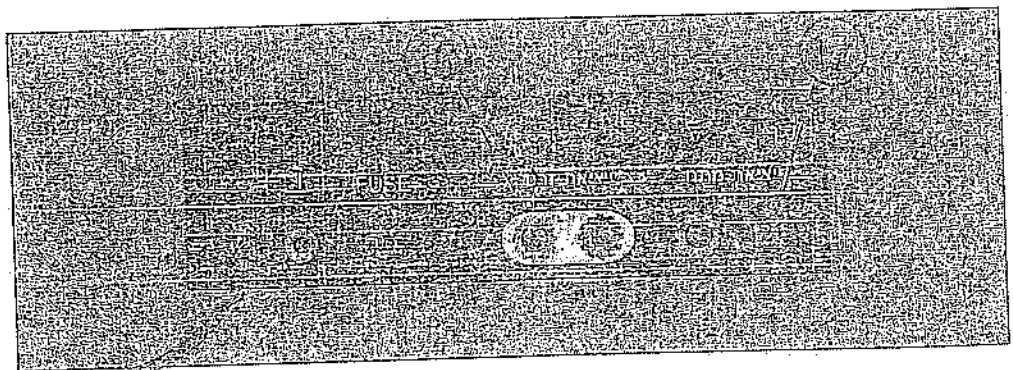
מודדים את הקצה החיצוני הקיצוני ביותר של הקרן. רושמים את הערך עליו הכוונת מצביעה.

מודדים באותה צורה גם את הקצה האופקי השני. הפרש המרחקים הוא קוטר הקרן.

הסרגל נתון בתוך שני חריצים ולצורך מדידה מדויקת יותר של קוטר הקרן יש להגביה ולהנמיך את הסרגל. יש לשים לב כי הסרגל מאוזן.

בחלק האחורי של המערכת ישנן יציאות המיועדות למדידת זרם ומתח באמצעות רב מודד חיצוני. איור 5 מתאר את היציאות. יציאות אלו מאפשרות ביצוע מדידת מתח וזרם מדויקים יותר בזמן ביצוע הניסוי.

רובינשטיין
יצוא ימאי ושיווק ציוד מדעי
קרן היסטור 15 טירת הכרמל
ת.ד. 263, מיקוד 30200
רב קורי 04-8576667



איור 5: יציאות למדידת מתח וזרם בצידה האחורי של המערכת

יציאת זרם ⑯ – מאפשרת חיבור של מד-זרם חיצוני. לצורך מדידה עם מד-זרם חיצוני יש להסיר את הפחית המקצרת. יש לוודא כי מד הזרם והחוטים המובילים אליו מסוגלים לעמוד בזרם של 3 אמפר.

יציאת מתח ⑰ – ניתן לחבר ליציאה מד מתח חיצוני.


המערכת נתונה בקופסת עץ שדפנותיה צבועות בשחור. הדבר מאפשר לבצע את הניסוי בחדר שאינו

מוחשך להלטיין. לדופן האחורית מוצמדת מראה צרה וארוכה המאפשרת לבצע את מדידת קוטר מסלול האלקטרונים.

מהלך הניסוי

1. לפני הדלקת המערכת מציבים את הבוררים 4 ו- 12 במצב כבוי.
2. את שני הפוטנציומטרים של בקרת מתח ההאצה 6 ובקרת מתח ההסיה 5 וכן את הפוטנציומטר של בקרת הזרם 9, יש לסובב נגד כוון השעון עד שנעצרים.
3. משחררים את הבורג המקבע את תושבת השפופרת (מימין לשפופרת) ומסובבים את השפופרת 2 עד שמד-הזווית 13 מורה על 90° .
4. מסובבים את פוטנציומטר בקרת מתח ההאצה 6 עד שמתקבל במד המתח 7 מתח של 100V. ניתן למדוד את המתח גם באמצעות מד מתח חיצוני ביציאה 17 בצידו האחורי של המכשיר.
5. מסובבים את בורר הזרם 12 למצב כיוון השעון ומכוונים את הפוטנציומטר של בקרת הזרם 9 עד שמד-הזרם 8 או מד-הזרם שמחובר ליציאה 16 מראים ערך של 0.5V.
6. באמצעות סרגל 14 וכוונת 15 מודדים את קוטר הקרן ממשיכים עם המדידות בקפיצות של 0.1 או 0.2 אמפר עד לזרם מקסימלי של 2 אמפר.
7. חזרו על הניסוי עבור מתח של 150V או 200V.

ש. רובינשטיין
 ייצור ימוא ושיחוק ציוד מדעי
 קרן היסוד 5, טירת הכרמל
 ת.ד. 263, מוקוד 30200
 ים רב קווי 8576667-04



מלאו את התוצאות שקיבלתם בטבלאות הבאות:

מתח ההאצה [V] V = _____

הזרם בסיליים I [A]	מרחק 1 מרחק 2 $r = (l_1 - l_2) / 2$	רדיוס הקרן	עוצמת השדה המגנטי $B = 10^{-3} I [T]$	$\frac{1}{r} [m^{-1}]$	$\frac{B}{\sqrt{2V}} [TV^{-\frac{1}{2}}]$
-----------------------	--	------------	--	------------------------	---

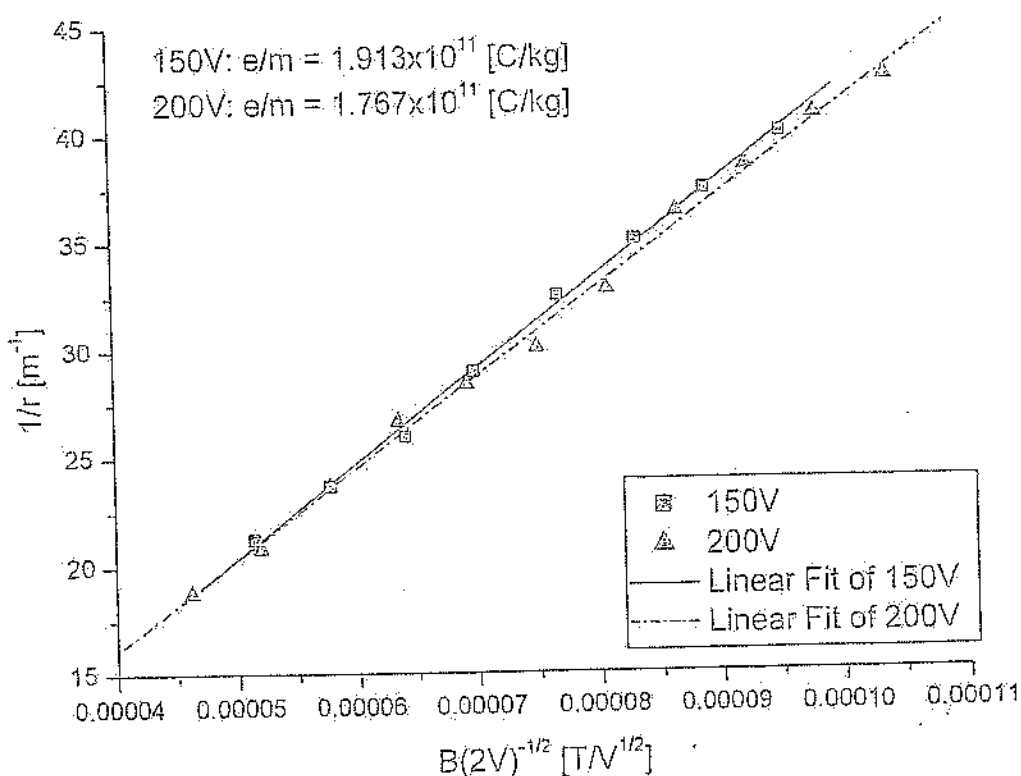


מתח ההאצה [V] $V =$ _____

הזרם בסלילים I [A]	מרחק 1 מרחק 2	רדיוס הקרן $r = (l_1 - l_2) / 2$	עוצמת השדה המגנטי $B = 10^{-3} I [T]$	$\frac{1}{r} [m^{-1}]$	$\frac{B}{\sqrt{2V}} [TV^{-1/2}]$

עיבוד נתונים והסקת מסקנות

1. הזים את התוצאות לתוך גיליון אלקטרון וציירו גרף של $1/r$ כפונקציה של $B/\sqrt{2V}$.
ענה יש ליצור לגרף התאמה ליניארית. שיפוע הישר הוא שורש היחס e/m העלאת השיפוע
בריבוע הוא היחס הנדרש. איור 6 מדגים את הגרף הנדרש.



איור 6: ההופכי של הרדיוס כפונקציה של עוצמת השדה ומתח ההאצה. שיפוע ההתאמה הליניארית הוא שורש e/m . ניתן לראות מניסוי זה כי ככל שמתח ההאצה גבוה יותר היחס קרוב יותר לערך המקובל.

הערך המקובל של היחס e/m הוא 1.759×10^{11} . מתוצאות הניסוי באיור 6 ובתוצאות הניסוי שערכתם ניתן

לראות כי ככל שמתח האנצה עולה התוצאה מתקרבת לערך המקובל. תופעה זו מובעת משתי סיבות. הראשונה היא שהחזר באנודה גורם לכך שהשדה החשמלי בין האנודה לקתודה בתותח האלקטרונים אינו אחיד ולפיכך מהירות האלקטרונים תהיה נמוכה מהערך התיאורטי שלהם. סיבה נוספת נעוצה בעובדה שהאלקטרונים מתנגשים באטומי הכספית המזילים מחלק מהם את מהירותם. מכיוון שהיחס e/m פרופורציוני ל- $1/r^2$ פרופורציוני למהירות האלקטרון, הערכים הנמדדים של e/m יושפעו משתי תופעות אלו.

2. איזו תופעה נוספת עלולה להקטין את דיוק המדידה, כיצד תתמודדו עם בעיה זו?