

## פרנק-הרץ (Frank -Hertz)

**מטרת הניסוי:** אישור קיומן של רמות אנרגיה באטומים. בניסוי שני חלקים: (א) מדידת אנרגיית ערור בכספית והשוואה לערך המתקבל מספקטרוסקופיה; (ב) מדידת מתח היינון של כספית.

### ספרות עזר:

A. Beiser, Concepts of Modern Physics, pp. 137-140.

A.P. Arya, Elementary Modern Physics, pp.172-174.

P.A. Tipler, Modern Physics, p. 155

**מכשור:** שפופרת פרנק-הרץ נתונה בתוך תנור המצויד בתרמומטר ותרמוסטט; ספק מתח המכיל  $6.3\text{ DCV}$  לחימום הקתודה,  $0-50\text{DCV}$  למתח ההאצה, ו- $0-5\text{DCV}$  למתח העצירה; פיקואמפרמטר; מולטימטר; מד-זרם ופוטנציומטר לקביעת זרם חימום הקתודה.

---

### מבוא

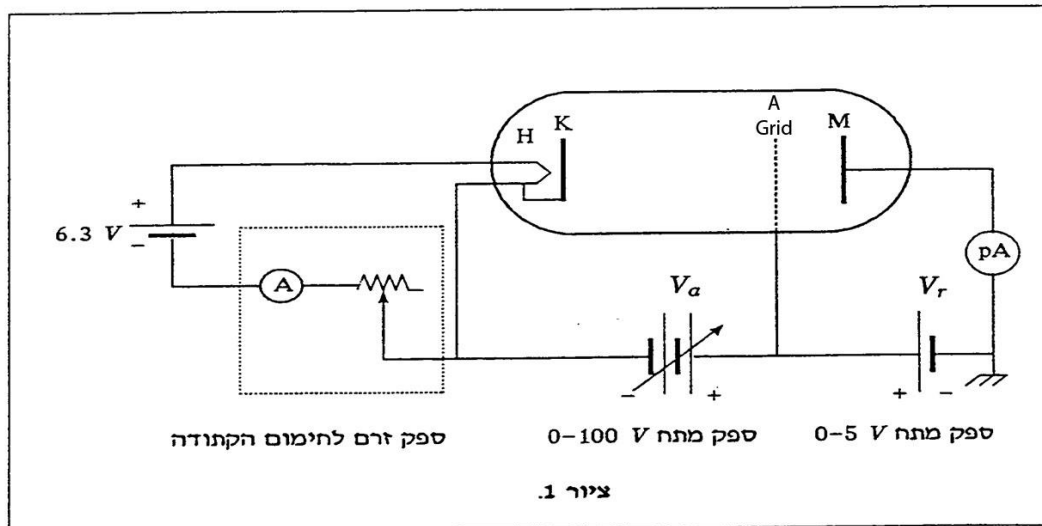
---

לפי מודל האטום של בוהר יכולים האלקטרונים להימצא ברמות אנרגיה שונות ובדידות וניתן להעביר אותם מרמה נמוכה לרמה גבוהה יותר על ידי השקעת כמות אנרגיה מתאימה. התהליך המוכר ביותר הוא על ידי בליעת פוטון, שמוסר את האנרגיה שלו ( $h\nu$ ) לאטום. אולם אין במודל האטום הכרח שהאנרגיה תבוא מפוטון דווקא, ואמנם ניתן לעורר את האטום על ידי הפגזתו באלקטרונים היכולים למסור את האנרגיה הקינטית שלהם לאלקטרוני האטום בתהליך של התנגשות אי-אלסטית. עקב ההתנגשות מעורר האטום לרמת אנרגיה גבוהה, והאלקטרון הפוגע בו מאבד אנרגיה קינטית ומואט.

ניסוי פרנק-הרץ מבוסס על גרימת ערור אטומי גז על ידי אלקטרונים המואצים בשדה חשמלי. בכך ניתן בידינו מכשיר נוסף למדידת רמות אנרגיה אטומיות וחקירת מבנה האטום. ב-1914 ניגשו פרנק והרץ לברר את השאלות הבאות:

- האם אפשר לעורר אטומים על ידי הפגזה באלקטרונים?
- האם האנרגיה המועברת לאטום היא תמיד בעלת ערכים בדידים?
- האם ערכים אלו מתיישבים עם התוצאות הספקטרוסקופיות?

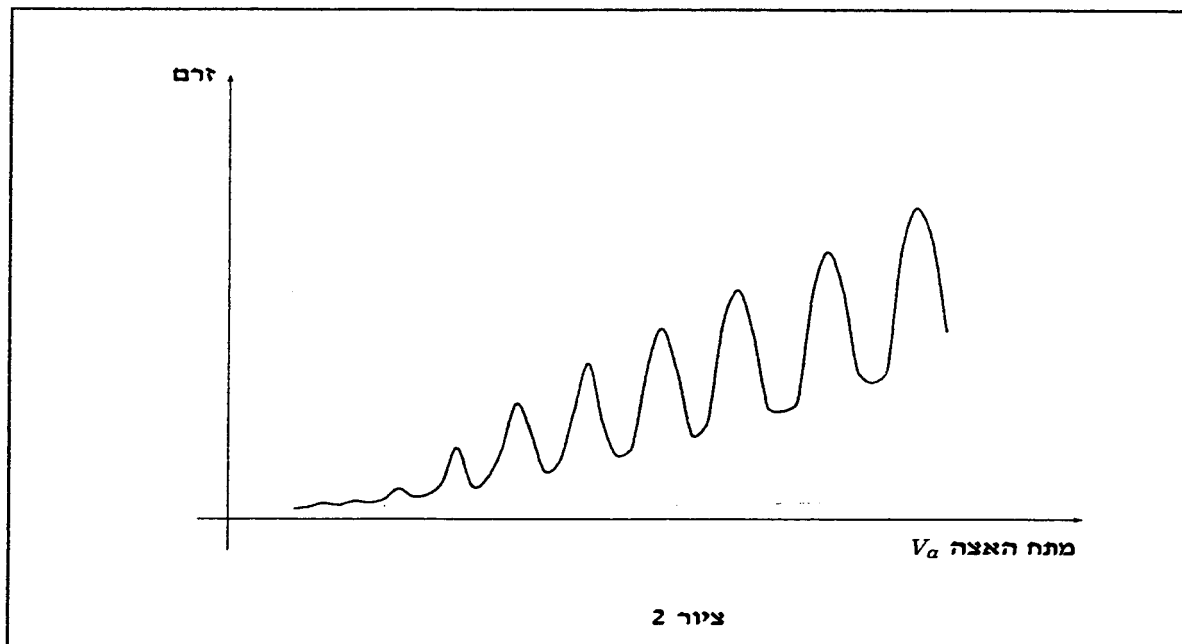
מערכת ניסויית שבעזרתה ניתן לברר שאלות אלו מתוארות בציור 1.



אלקטרונים נפלטים מן הקתודה K, המחוממת על ידי גוף חימום H, האלקטרונים מואצים לעבר האנודה A על ידי מתח ההאצה  $V_a$ . צורת האנודה היא סריג, כך שהאלקטרונים עוברים דרכה ונעים לעבר אלקטרודה מאפסת M. לאלקטרודה M מתח שלילי  $V_r$  (מתח האטה) לעומת האנודה A, ולכן האלקטרונים מואטים בדרכם ל-M. זרם האלקטרונים נמדד במד-זרם פיקואמפרמטר (pA).

בשפופרת ישנם אדים של החומר הנבדק, והאלקטרונים מבצעים התנגשויות עם האטומים. כאשר מתח ההאצה  $V_a$  קטן, תהיה לאלקטרונים אנרגיה קינטית נמוכה, שלא תספיק לעורר את האטומים מרמת היסוד לרמת האנרגיה הראשונה. משום כך ההתנגשויות תהיינה אלסטיות, והאלקטרונים יגיעו לאנודה עם מלוא האנרגיה הקינטית שהוקנתה להם על ידי המתח המאיץ (בגלל יחס המסות  $m_e / m_{atom} \approx 10^{-5}$  יפסידו האלקטרונים רק חלק קטן מאוד מהאנרגיה הקינטית שלהם בהתנגשות אלסטית). הם יצליחו להתגבר על מתח העצירה הקטן  $V_r$ , ויגיעו ל-M וימדד זרם באמפרמטר.

אם אלומת האלקטרונים מואצת למתח השווה לאנרגיה של רמה מעוררת, יבצעו חלק מהאלקטרונים התנגשויות אי-אלסטיות, ויפסידו את כל האנרגיה הקינטית שלהם. אלקטרונים אלו לא יצליחו להתגבר על מתח העצירה ותחול ירידה פתאומית בזרם המגיע לאלקטרודה המאספת. אם שוב יוגדל המתח  $V_a$  יואצו האלקטרונים אחרי ההתנגשות האי-אלסטית וזרם האנודה יגדל שוב, עד אשר יוכלו האלקטרונים לבצע שתי התנגשויות בדרכם מהקתודה לסריג. אם מודדים את זרם האנודה כפונקציה של המתח המאיץ, מקבלים תלות מחזורית, כמתואר בציור 2. מכל האמור לעיל ברור שהפרש המתחים בין שני שיאים עוקבים שווה בדיוק לאנרגיית הרמה המעוררת של האטום הנבדק.



ציור 2

לעומת זאת, המתח בשיא הראשון של הזרם אינו שווה להפרש המתחים בין שני שיאים עוקבים. כדי להבין זאת, עלינו למצוא את הקשר בין מתח ההאצה לאנרגיה הקינטית הנצברת על ידי אלקטרון. דרושה אנרגיה מסוימת  $e\phi$  (בתדריך זה  $e$  מסמן גודל מטען חיובי) לשחרר אלקטרון ממתכת, כאשר  $\phi$  פונקצית עבודה. בציור 3 ישנו תאור של האנרגיה הפוטנציאלית של אלקטרון הנפלט מהקתודה. אם רמת האנרגיה האלקטרונית הגבוהה ביותר בתוך הקתודה היא  $E_F(K)$ , ואם  $\phi_K$  היא פונקצית העבודה של הקתודה, אזי האנרגיה הפוטנציאלית של אלקטרון הנפלט מן הקתודה היא  $E_F(K) + e\phi_K$ . באופן דומה, האנרגיה הפוטנציאלית של אלקטרון ליד האנודה היא  $E_F(A) + e\phi_A$ , כאשר  $E_F(A)$  היא רמת האנרגיה האלקטרונית הגבוהה ביותר בתוך האנודה, ו- $\phi_A$  פונקצית העבודה של האנודה. האנרגיה הקינטית של אלקטרון הנפלט מן הקתודה היא זניחה, אבל האלקטרון מואץ בדרך לאנודה ועל כן צובר אנרגיה קינטית  $E_{kin}$ . לפי חוק שימור האנרגיה (אם לא היתה התנגשות אי-אלסטית):

$$E_F(K) + e\phi_K = E_F(A) + e\phi_A + E_{kin} \quad (1)$$

ההפרש בין  $E_F(K)$  ו-  $E_F(A)$  נובע מהפרש הפוטנציאלים  $V_a$  בין שתי האלקטרודות:

$$E_F(K) - E_F(A) = eV_a \quad (2)$$

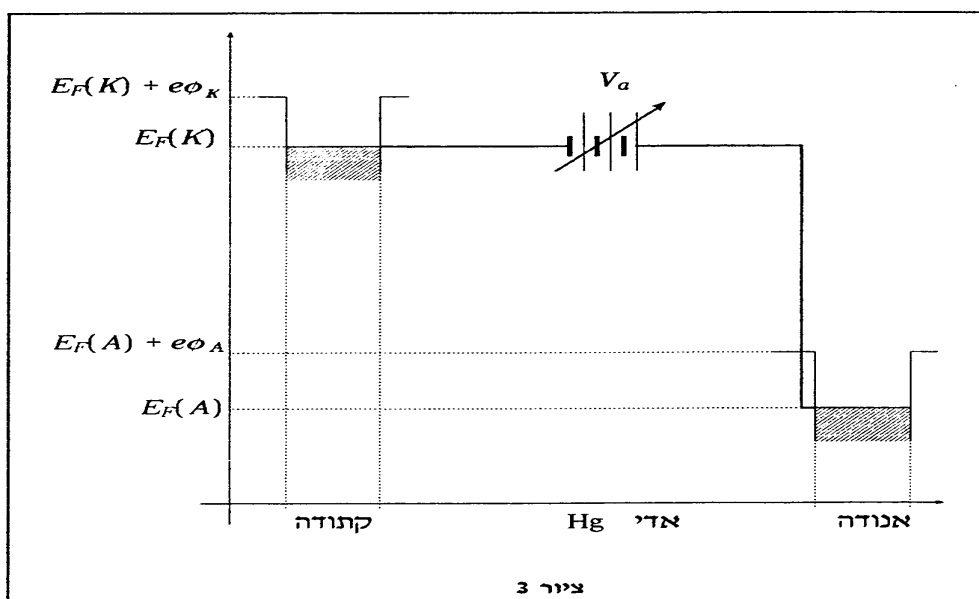
אם מציבים את (2) ב-(1) מקבלים:

$$eV_a = E_{kin} + e(\phi_A - \phi_K) \quad (3)$$

ההפרש  $(\phi_A - \phi_K)$  נקרא מתח מגע.

במקום של השיא הראשון בזרם (ראו ציור 2) האנרגיה הקינטית של האלקטרון שווה לרמת האנרגיה המעוררת של האטום. ממשוואה (3) רואים ההצבה  $V_a$  בשיא הראשון שווה לסכום של האנרגיה של הרמה המעוררת (מחולק ב- $e$ ) ומתח המגע.

מהי הרמה שאותה מעוררים? התשובה תלויה בתנאי הניסוי. הניסוי שלנו נערך בשפופרת המכילה מספר טיפות של כספית. השפופרת נמצאת בתנור ועל ידי העלאת הטמפרטורה, ניתן להגדיל את לחץ האדים של הכספית. בטמפרטורה נמוכה, כאשר לחץ האדים נמוך, יבצע האלקטרון מספר קטן של התנגשויות ויוכל לרכוש אנרגיה קינטית גבוהה, ויוכל אף לגרום ליינון. כאשר הטמפרטורה גבוהה יותר יגדל לחץ האדים, מספר ההתנגשויות יגדל, והאלקטרון ירכוש כמות קטנה יותר של אנרגיה קינטית. לפיכך הוא יעורר את אטומי הכספית לרמה מעוררת נמוכה.



## תאור הניסוי

### א. מדידת אנרגיית ערור של כספית

בשלב זה מעלים את הטמפרטורה כדי שיהיו יותר התנגשויות אי-אלסטיות. מחברים את המעגל לפי ציור 1, ומודדים את הזרם כפונקציה של המתח. מן העקומה  $I - V$  המתקבלת מודדים את אנרגיית הערור ומתח המגע. האלקטרודה M נמצאת בפוטנציאל גבוה מהקתודה כך שנושאי הזרם הם האלקטרונים היוצאים מהקתודה.

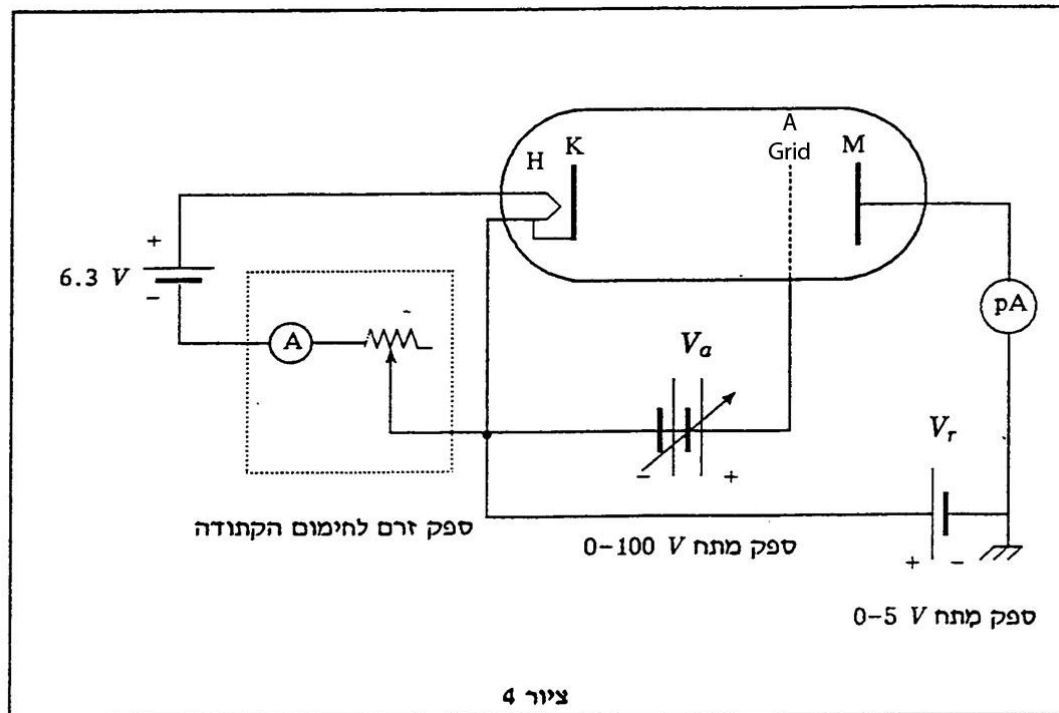
### ב. מדידת מתח היינון של כספית

כפי שהוסבר במבוא, אפשר ליינן את אטומי הכספית אם לחץ האדים (הטמפרטורה) נמוך מספיק. ניתן לבצע מדידה של מתח היינון על ידי שימוש במעגל של ציור 4. מחברים מתח עצירה של 1V בין האלקטרודה המאספת M לקתודה. זה מבטיח ש-M תהיה תמיד בפוטנציאל נמוך מהקתודה, בלי תלות במתח האנודה, ומשום כך לא יגיעו אליה אלקטרונים שנפלטים מהקתודה. יונים

חיוביים שנמצאים בין האנודה לאלקטרודה המאספת יימשכו אל M ויגרמו לסטייה של הפיקואמפרמטר (באיזה כיוון?). במתח  $V_a^\circ$  שעבורו האנרגיה הקינטית של האלקטרונים המואצים שווה לאנרגיית היינון, מתחיל זרם היונים. לפי משוואה (3),  $eV_a^\circ$  הוא הסכום של אנרגיית היינון ומתח המגע.

### פריצה בשפופרת פרנק הרץ

כאשר גז נמצא במתח גבוה מספיק ולחץ נמוך מספיק, הגז יכול להתיינן ולהפוך לפלזמה. בלחץ נמוך, הקצב שבו היונים חוזרים להיות נייטרלים קטן מהקצב שבו הגז מתיינן והתהליך לא דועך. במצב זה הפלזמה המתקבלת מוליכה זרם גבוה שיכול להסב נזק לשפופרת. מסיבה זו, יש להימנע מיצירת מצב של פריצה בשפופרת.



### תיאור המערכת

מערכת הניסוי מופיעה באיור 5. המערכת מורכבת משפופרת פרנק הרץ, ספקי מתח עבור מתח ההאצה  $V_a$  (איור 6), מתח ההאטה  $V_r$  וזרם החימום של הקתודה (איור 7). כמו כן, על מנת למדוד את זרם האלקטרודה המאספת M משתמשים בפיקואמפרמטר (איור 8). שפופרת פרנק הרץ, תנור החימום שקובע את טמפרטורת גז הכספית וצמד תרמי (thermocouple) נמצאים בתוך הקופסה הימנית עם החלון.

בעוד שמתח ההאטה וזרם חימום הקתודה נקבעים בספקים שלהם, ספק מתח ההאצה מחובר למחשב ונשלט באמצעות תוכנה. הזרם שנמדד בפיקואמפרמטר מועבר גם הוא למחשב ומוצג באותה תוכנה, יחד עם טמפרטורת גז הכספית כפי שנמדדה בצמד התרמי.



איור 5: המערכת של ניסוי פרנק הרץ



איור 6: ספק מתח ההאצה



איור 7: ספקי מתח ההאטה (משמאל) וזרם חימום הקתודה (מימין)



איור 8: פיקואמפרמטר

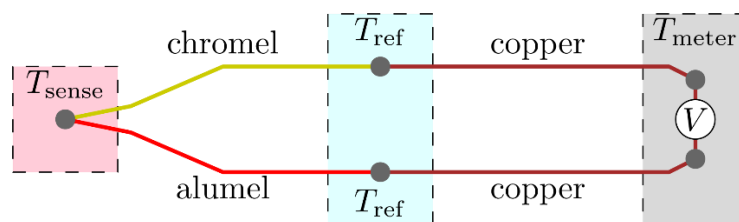
אל הממשק למחשב מחובר הצמד התרמי והממשק מכיל מגבר שמגדיל את המתח החשמלי המתקבל מהצמד התרמי ממיקרוולטים בודדים לכדי מיליוולטים. כמו כן הממשק מכיל בתוכו בקר PID שמייצב את טמפרטורת הגז לזו הרצויה, כפי שהוגדרה בתוכנה במחשב. הצמד התרמי עצמו מודבק על זכוכית השפופרת ומודד את הטמפרטורה בנקודה זו באמצעות אפקט סיבק (Seebeck).

### אפקט סיבק (Seebeck) בצמד תרמי

בחומרים מוליכים, כמות אלקטרוני ההולכה (האלקטרונים החופשיים לנוע החומר) תלויה בטמפרטורה וגדלה ככל שהטמפרטורה עולה. אם קיימים הפרשי טמפרטורה לאורך מוליך, אלקטרונים יזרמו מהצד החם לעבר הצד הקר ובמצב יציב יתפתח מתח בין שני קצות המוליך. מתח זה שווה לכפל של הפרש הטמפרטורה במקדם סיבק של חומר המוליך.

כדי למדוד טמפרטורה בעזרת אפקט זה, מנצלים את התלות של מקדם סיבק בסוג החומר. על חומרים שונים שקצותיהם מוחזקים באותו הפרש טמפרטורה יתפתחו הפרשי מתחים שונים. צמד תרמי מסוג K מנצל זאת באופן הבא: המעגל החשמלי מורכב ממתכות שונות הנמצאות בשלוש טמפרטורות שונות ומודדים את סכום המתחים המתפתחים עליהן.

כפי שמופיע באיור 9, שני חוטי נחושת מוחזקים בהפרש הטמפרטורות  $T_{ref}$  –  $T_{meter}$  אך המתחים המתפתחים עליהם שווים והפוכים בכיוונם ולכן הם מתבטלים. לעומתם, הסגסוגות אלומל וכרומל מפתחות מתחים שונים תחת הפרש הטמפרטורות  $T_{ref}$  –  $T_{sense}$  וההפרש בין מתחים אלו נמדד במד המתח. במד הטמפרטורה K,  $T_{ref}$  מוחזק בטמפרטורת החדר ולאחר כיול ניתן לחלץ מהמתח את  $T_{sense}$ .



איור 9: סכמה של צמד תרמי מסוג K בו משתמשים בניסוי

## שאלות הכנה

1. מה קובע את לחץ הכספית בשפופרת ההתפרקות?
2. מה השפעת זרם החימום של הקתודה על מיקום נקודות המקסימום ונקודות המינימום של הזרם בגרף המתואר בציר 2? מה השפעת זרם החימום על עוצמת הזרם בגרף?
3. אם לא היתה כספית בשפופרת, כיצד היתה נראית העקומה  $I(V)$ ?
4. אם  $eV_r$  גדול יותר מאנרגיית הערור, מה תהיה צורת העקומה  $I(V)$ ?
5. מה הגורם המספק לאלקטרונים את האנרגיה הדרושה להשתחרר מהקתודה?
6. קרא את המאמר: Rapior, Gerald, Klaus Sengstock, and Valery Baev. "New features of the Franck-Hertz experiment." *American journal of physics* 74.5 (2006): 423-428. וחשב את השינוי היחסי במספר ההתנגשויות המתרחשות במוצע בין האנודה לקתודה (שממוקמות במרחק של 8mm זו מזו בשפופרת) הנגרם משינוי טמפרטורת הגז בניסוי (מ-170°C ל-110°C).

**זהירות: אין להפעיל את ספקי המתח לפני אישור המדריך!**

**א. מדידת אנרגיית ערור של כספית והשוואה לתוצאה ספקטרוסקופית**

1. חבר את המעגל המתואר בציור 1 (בדומה לאיור 5). הפיקואמפרמטר מחובר לאלקטרודה מאספת M דרך כבל קואקסיאלי. הזרם נכנס לפיקואמפרמטר דרך התיל הפנימי של הכבל ויוצא דרך המעטפת המתכתית. מעטפת זאת מוארקת. הזרם הנמדד מועבר למחשב וגם מוצג על מסך הפיקואמפרמטר.

2. **פנה למדריך לבדיקת המעגל !!!** לאחר מכן וודא שווסת התנור (בצד הקופסה) מכוון ל-200 מעלות, להגבלת טמפרטורת השפופרת עד ל-200 מעלות צלזיוס.

3. הדלק את הספקים, את הממשק למחשב ואת הפיקואמפרמטר ו**לאחר מכן** פתח את התוכנה FranckHertz במחשב.

4. וודא שהכבלים והחוטים לא נוגעים בתנור והפעל את התנור (oven heater) בתוכנה. בחר את הטמפרטורה הרצויה כ-170°C. טמפרטורת התנור כתלות בזמן מוצגת בגרף התחתון מצד ימין.

בקר הטמפרטורה מפעיל את תנור החימום לסירוגין באופן שמייצב את הטמפרטורה לזו הרצויה. הוא "מחליט" מתי להפעיל ולכבות את גוף החימום לפי מדידת ההפרש בין הטמפרטורה הרצויה לזו הנמדדת בצמד התרמי באותה נקודת זמן.

פונקציית בקר ה-PID (proportional-integral-derivative controler), כמו זה שנמצא בממשק, מחשבת את ההפרש בין האותות, אינטרגל ההפרש (השגיאה המצטברת) ונגזרת ההפרש לפי הזמן, כופלת אותם במקדמים תלויי מערכת הניתנים לכיול והסכום המתקבל הוא הגודל לפיו הבקר מחליט אם להפעיל או לכבות את גוף החימום.

8. קבע בספק מתח מתח העצירה מתח של  $V_r \approx 1.5V$  בין האנודה לאלקטרודה המאספת.



9. וודא שספק המתח של הקתודה מזרים בה זרם של כ-300mA והמתח מוגבל לתחום 6-8V. הגדל את המתח והזרם עד שהקתודה מקבלת צבע כתום כתוצאה מהחימום (ראה תמונה בצד).

10. כדי להתחיל מדידה יש לבחור את הפרמטרים של מתח ההאצה: מתח התחלתי, מתח סופי וצעד הסריקה שלו וללחוץ על start sweep. **שים לב! הפיקואמפרמטר רגיש מאוד לרעשים. על מנת שהסריקה תהיה ללא הפרעות אין לגעת בציוד/בשולחן ויש להקפיד על שקט יחסי.** להתחיל



מהתחום  $0 - 30V$  בקפיצות של  $0.1V$  או  $0.2V$  כדי שלא לדלג על קפיצת הזרם הראשונה. וודא שיש לך מספיק מדידות סביב נקודות האקסטרמה של העקום על ידי שינוי הקפיצות במטח.

**שים לב** שבמתחים גבוהים תיתכן פריצה והזרם יגדל מאוד. במצב זה יציין ה-Over current indicator שהזרם גבוה מידי ויפסיק את המדידה. כדי לחזור למדוד יש ללחוץ על Reset. יש להימנע מהגעה למצב של פריצה בשפופרת ולבחור בזהירות את המתח המקסימאלי של הסריקה.

על מנת למחוק את המדידות הקיימות (עד חמש מדידות שונות) ולהתחיל מדידה חדשה יש ללחוץ על Clear Graph Data בתחתית המסך מצד שמאל.

11. כדי לשמור את הנתונים לקובץ CSV, יש ללחוץ על Save Graph Data. שמור את המדידה של עקום פרנק-הרץ וטען את המדידות לתוכנת עיבוד. שרטט את הגרף של עקום פרנק-הרץ.

12. מתוך הגרף, מצא את אנרגיית העירור של הכספית ואת מתח המגע בין K ל-A.

כעת, על מנת לבחון האם וכיצד הגדלים שמדדת תלויים בתנאי ההפעלה של מערכת הניסוי, אתה תשנה את תנאי ההפעלה ותבחן את השפעת שינויים אלו:

13. בהתאם לשאלת הכנה 2, מדוד את השפעת שינוי זרם החימום של הקתודה על עקום פרנק-הרץ ואמת את תשובותיך על ידי הצגת גרף מתאים. ענה: אילו שינויים נוספים נגרמו משינוי זרם החימום וכיצד ניתן להסביר אותם? אל תגדיל את הזרם מעבר ל- $350mA$  ושים לב כי לאחר שינוי הזרם בקתודה, לוקח לפליטת האלקטרונים כ- 30 שניות על מנת להתייבב.

14. ענה: מהי ההשפעה של מתח העצירה על צורת עקום פרנק הרץ (החל מערך אפסי ועד ערך גדול מאוד)? בצע מדידות שמראות זאת ודון בשינויים בצורת העקום. מה נמדד כאשר מתח העצירה גדול יותר מאנרגיית העירור של הכספית? (לשם כך, עליך להעריך מהי אנרגיית העירור ולמדוד בתחום הגדול ממנה)

15. בנוסף: הערך מהי ההשפעה של טפמי גז הכספית על צורת עקום פרנק הרץ. בצע מדידה המראה שינוי זה, הצג את התוצאות בגרף ודון בשינויים שהגרף מציג.

16. לסיכום, ענה: מהם התנאים האופטימאליים למדידת עקום פרנק הרץ ומהן הסיבות לכך? אילו תנאי הפעלה של המערכת יכולים לתרום לשגיאה השיטתית? כיצד התוצאות שמדדת מוכיחות ששיטה זו אכן מודדת את אנרגיית העירור של אטום הכספית (ולא פרמטר אחר במערכת)?

17. אילו ביצעת מדידות ספקטרוסקופיות במקביל למדידות החשמליות, היית מקבל ספקטרום פליטה המכיל רק קו אחד,  $253.65nm$  ( $1nm = 10^{-9}m$ ). השווה את אנרגיית העירור המתקבלת מעקום פרנק-הרץ לאנרגיה של הקו הספקטראלי של הכספית.

## I. מדידת מתח היינון של כספית

1. יצב את טמפרטורת התנור ב-  $100^{\circ}C - 120^{\circ}C$ .

2. חבר את המעגל המתואר בציור 4. שים לב, איזה חיבור יש לשנות?
5. זרם חימום הקתודה האופטימאלי תלוי במערכת. קבע את הזרם לכ-  $300mA$ .
6. קבע מתח עצירה  $V_r = 1V$  בין הקתודה K לאלקטרודה המאספת M.
7. בצע סריקה של מתחי האצה בתחום  $0 - 15V$ . אם אתה מגיע לתנאי פריצה, הקטן את המתח המקסימאלי.
8. מדוד את מתח היינון של כספית. התחשב במתח המגע שקיבלת בחלק הראשון של הניסוי. באלו שיטות הערכה השתמשת על מנת למצוא את מתח היינון? הערך את השגיאה. בדוק עם המדריך את הערך שקיבלת.
9. בונוס: מדוד את ההשפעה של אחד מפרמטרי המדידה (טמפרטורת השפופרת, זרם החימום של הקתודה) על עקום היינון והסבר את התוצאות. ענה: מהם התנאים האופטימאליים למדידה זו?