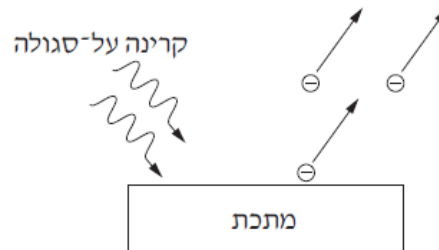


בשנת 1887 גילה היינריך הרץ כי אם מטיילים קרינה על-סגולה על מתכת שהאוויר סביבה הוא ניטרלי מבחינה חשמלית, האוויר שבקרבת המתכת נטען במטען חשמלי שלילי (ראה תרשים). לאחר כמה שנים כונתה תופעה זו "האפקט הפוטו-אלקטרי".



קבוצה I וקבוצה II של תלמידי פיזיקה החליטו לשחזר את הניסוי של הרץ. לשם כך הם ערכו ניסויים שבהם הטילו על לוח מתכת בלתי טעון אלומות קרינה מונוכרומטיות שהתדירויות שלהן ידועות. האלומות הוטלו זו אחר זו, ועבור כל תדירות של אלומה מדדו התלמידים את הפוטנציאל של לוח המתכת אחרי התייצבותו לעומת מצבו ההתחלתי (הבלתי טעון). פוטנציאל הלוח נמדד באמצעות מכשיר מדידה מיוחד ללא צורך בחיבור המתכת למעגל חשמלי. תוצאות המדידות של קבוצה I מוצגות בטבלה 1.

טבלה 1: תוצאות המדידות (קבוצה I)

12.0	11.5	11.0	10.5	10.0	9.5	9.0	תדירות הקרינה (10^{14}Hz)
0.86	0.67	0.5	0.3	0.03	0	0	פוטנציאל הלוח (V)

- א. על פי ערכי טבלה 1, סרטט גרף של הפוטנציאל של לוח המתכת כפונקציה של תדירות הקרינה הפוגעת בו. (8 נקודות)
- ב. בגרף שסרטטת, מהי המשמעות הפיזיקלית של נקודת החיתוך של החלק הנטוי של העקומה עם הציר האופקי? (4 נקודות)
- ג. באמצעות הגרף שסרטטת מצא את פונקציית העבודה של המתכת. הסבר את שיקוליך. ($8\frac{1}{3}$ נקודות)
- ד. באחד השלבים של הניסוי, פוטנציאל הלוח היה 0.3V . התלמידים הקרינו על הלוח אלומת קרינה בתדירות של $11.0 \cdot 10^{14}\text{Hz}$ (ראה טבלה 1).
- (1) הסבר מדוע השתחררו אלקטרונים מלוח המתכת.
- (2) מה קרה לפוטנציאל הלוח בעקבות השתחררות האלקטרונים? (9 נקודות)

קבוצה II רצתה לאמת את ממצאי הניסויים של קבוצה I.
 על לוח מתכת אחר, בלתי טעון, הטילו תלמידי קבוצה זו אלומות בתדירויות המוצגות בטבלה 1,
 זו אחר זו, ומדדו גם הם עבור כל תדירות את ערכי הפוטנציאל של הלוח לעומת מצבו ההתחלתי.
 תוצאות המדידות מוצגות בטבלה 2.

טבלה 2: תוצאות המדידות (קבוצה II)

12.0	11.5	11.0	10.5	10.0	9.5	9.0	תדירות הקרינה (10^{14} Hz)
0.67	0.5	0.3	0.03	0	0	0	פוטנציאל הלוח (V)

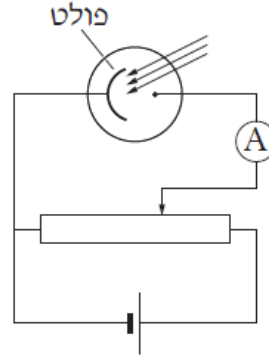
ה. כפי שעולה מטבלה 1 ומטבלה 2, יש הבדלים בין תוצאות המדידות של שתי הקבוצות.

התלמידים הציעו כמה הסברים להבדלים אלה.

קבע איזה מן המשפטים (1)-(4) שלפניך יכול לספק הסבר נכון להבדלים האלה, ונמק
את קביעתך. (4 נקודות)

- (1) בקבוצה I השתמשו בקרינה שעוצמתה גבוהה מזו שהשתמשו בה בקבוצה II.
- (2) בקבוצה I השתמשו בקרינה שעוצמתה נמוכה מזו שהשתמשו בה בקבוצה II.
- (3) בקבוצה I השתמשו בלוח העשוי מתכת אחרת מזו שהשתמשו בה בקבוצה II.
- (4) קבוצה I הציבה את לוח המתכת קרוב יותר למקור הקרינה מאשר הציבה אותו קבוצה II.

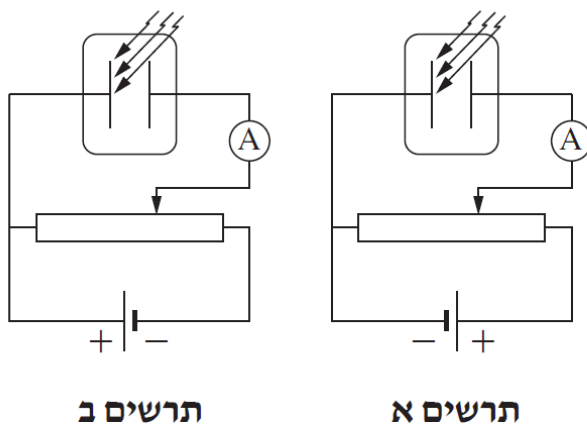
בתרשים שלפניך מעגל חשמלי שאפשר למדוד בו את זרם הרוויה בתא פוטואלקטרי. מקרינים אור בתדירות קבועה f על תא פוטואלקטרי.



- א.** נסמן ב- n_e את מספר האלקטרונים הנפלטים בכל שנייה מהפולט. פתח ביטוי לחישוב של n_e באמצעות עוצמת זרם הרוויה I וערך המטען היסודי e . (6 נקודות)
- ב.** הסבר מדוע שינוי בהספק של מקור האור גורם לשינוי ב- n_e . (9 נקודות)
- ג.** הנוסחה לחישוב הספק היא $P = \frac{\Delta E}{\Delta t}$. פתח ביטוי המקשר בין ההספק של מקור האור P ובין n_e , בהנחה שכל פוטון בעל תדירות f שיוצא ממקור האור משחרר אלקטרון. (7 נקודות)
- למעשה, לא כל פוטון משחרר אלקטרון. נסמן ב- η (נצילות) את היחס בין מספר הפוטונים המשחררים אלקטרונים בכל שנייה ובין מספר הפוטונים שמקור האור פולט בכל שנייה: $\eta = \frac{n_e}{n_{\text{photons}}}$.
- ד.** הוכח שהקשר בין מספר הפוטונים המשחררים אלקטרונים בכל שנייה ובין מספר הפוטונים שמקור האור פולט בכל שנייה מוצג בנוסחה $\eta = \frac{hf \cdot n_e}{P}$, P – הספק מקור האור, f – תדירות האור. (6 נקודות)
- ה.** במעגל המתואר בתרשים, הגדלת המתח על התא הפוטואלקטרי גורמת להגדלת הזרם, עד גבול מסוים שהוא זרם הרוויה. הסבר תופעה זו. (5 $\frac{1}{3}$ נקודות)

3. תלמידי פיזיקה ערכו ניסוי בתא פוטואלקטרי, והאירו את הפולט (הקתודה) באור שתדירותו $6.67 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$. התלמידים בודקים את התלות של זרם הרוויה בהספק האור הפוגע בפולט.

א. באיזה משני המעגלים המוצגים בתרשימים א ו- ב השתמשו התלמידים בניסוי? נמק. (5 נקודות)



תרשים ב

תרשים א

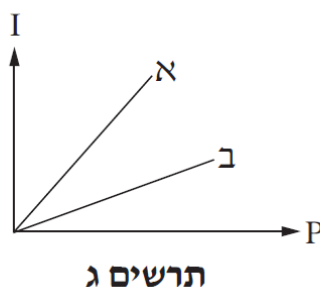
ב. בניסוי התלמידים הגדילו את הספק האור הפוגע בפולט. האם כתוצאה מכך זרם הרוויה הנמדד גדל, קטן או לא השתנה? נמק. (7 נקודות)

נסמן ב- η את יעילות התא הפוטואלקטרי, המבטאת את היחס בין מספר הפוטונים שגרמו לפליטת אלקטרונים ובין מספר הפוטונים שפגעו בפולט. כשהספק האור הפוגע בפולט היה $6 \cdot 10^{-3} \text{ W}$, מדדו התלמידים זרם רוויה של $2.16 \cdot 10^{-7} \text{ A}$.

ג. חשב את מספר האלקטרונים שנפלטים מהפולט בכל שנייה. (5 נקודות)

ד. חשב את יעילות התא הפוטואלקטרי. (10 נקודות)

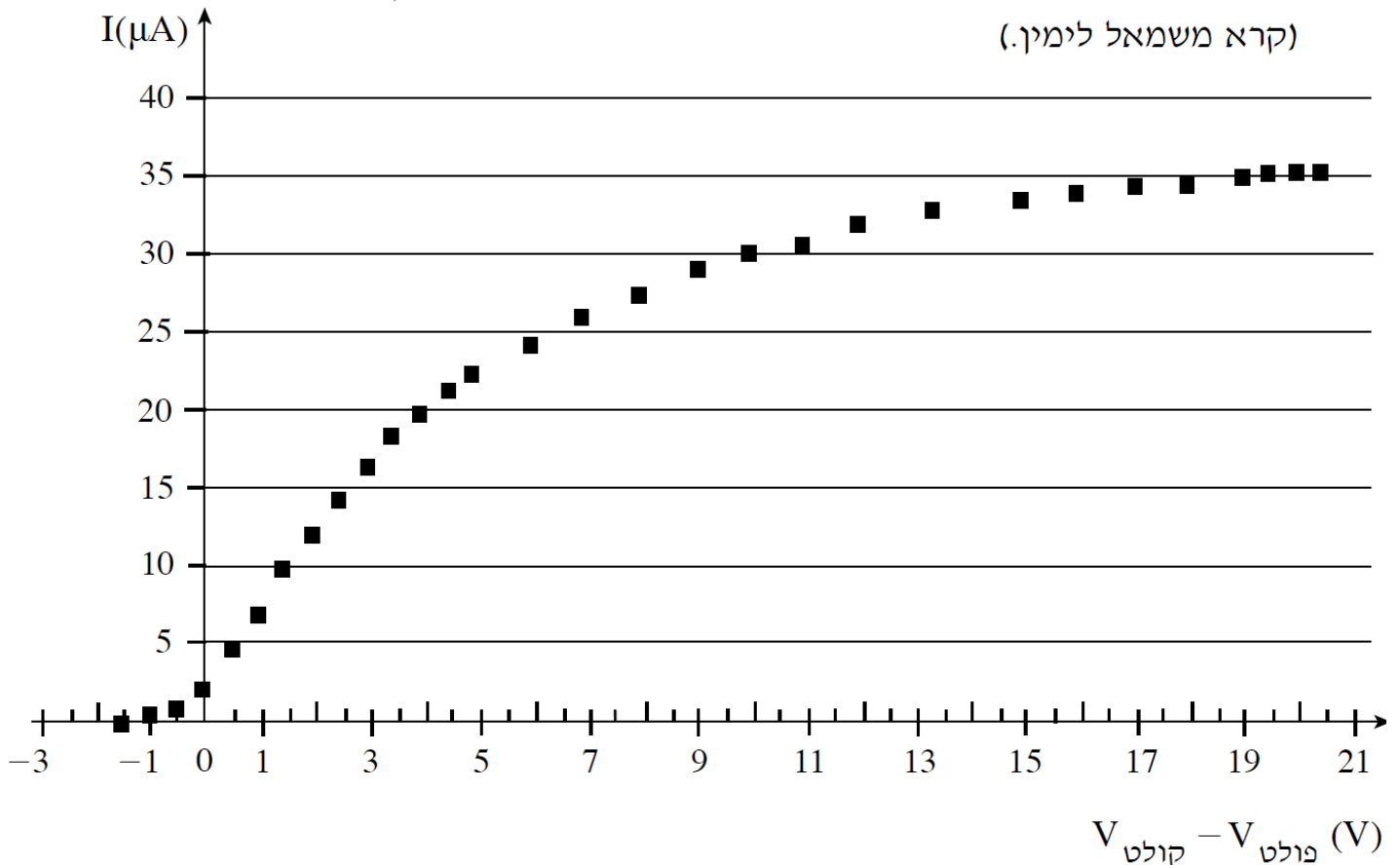
ה. בתרשים ג שתי עקומות א ו- ב. בעקומות מוצג הקשר בין זרם הרוויה, I , ובין הספק האור הפוגע בפולט, P , עבור שני תאים פוטואלקטריים שיעילותם שונה. איזה משתי העקומות מתאימה לתא שיעילותו גבוהה יותר? נמק. (6 $\frac{1}{3}$ נקודות)



תרשים ג

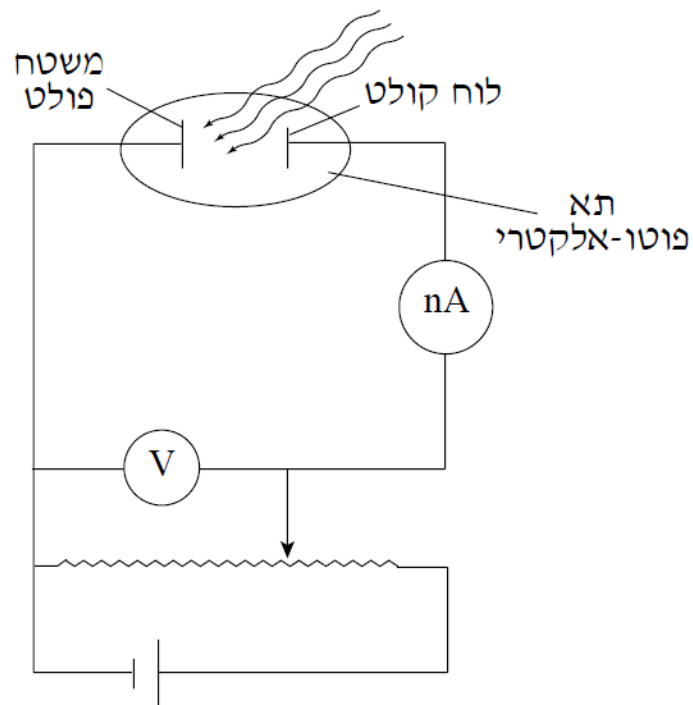
4. תלמידה מבצעת ניסוי לקבלת אופיין של תא פוטואלקטרי. לשם כך היא בונה מעגל חשמלי מתאים, ומקרינה על הפולט (קתודה) של התא אור לבן, הכולל את כל אורכי הגל בין $400 \text{ nm} - 700 \text{ nm}$. על סמך המדידות סרטטה התלמידה את האופיין, והוא מוצג בתרשים שלפניך: עוצמת הזרם, I , כפונקציה של הפרש הפוטנציאלים $(V_{\text{קולט}} - V_{\text{פולט}})$.

(קרא משמאל לימין.)



- א. הסתמך על הגרף ותאר כיצד הגדלת הפרש הפוטנציאלים משפיעה על עוצמת הזרם הנמדד. התייחס לטווח $0\text{V} - 21\text{V}$. (6 נקודות)
- ב. חשב את מספר הפוטונים שגורמים לעקירת אלקטרונים מהפולט בכל שנייה. (8 נקודות)
- ג. (1) קבע את הערך של האנרגיה הקינטית המקסימלית של אלקטרונים הנעקרים מהפולט.
(2) מהו אורך הגל של הפוטון שגרם לעקירת אלקטרונים עם אנרגיה זאת? (8 נקודות)
- ד. חשב את פונקציית העבודה של המתכת שממנה עשוי הפולט הנתון. (6 נקודות)

תלמיד ביצע ניסוי כדי לחקור אפקט פוטו-אלקטרי. לרשותו עמדו:
 מקור אור לבן, מסננים בצבעים שונים (על כל מסנן כתוב אורך הגל המינימלי, λ_0 ,
 המועבר על ידי המסנן) ותא פוטו-אלקטרי.
 התלמיד הרכיב מעגל חשמלי המתואר בתרשים. בכל פעם הוא הציב בדרכה של
 אלומת האור הלבן את אחד המסננים, ומדד את מתח העצירה (V).



הנתונים שהתקבלו מוצגים בטבלה שלפניך.

מתח העצירה (V)	אורך הגל המינימלי λ_0 (nm)
0.4	650
0.5	620
0.7	560
0.8	540
1.0	500
1.2	460
1.6	400

א. (1) בלי להסתמך על תוצאות הניסוי, פתח ביטוי המתאר את מתח העצירה (V)

כפונקציה של אורך הגל המינימלי (λ_0).

(2) האם הקשר שהתקבל הוא לינארי? נמק.

(9 נקודות)

ב. (1) העתק את הטבלה למחברתך, והוסף לה עמודה שבה תרשום את הערכים

המתאימים של $\frac{1}{\lambda_0}$.

(2) סרטט גרף של מתח העצירה, V, כפונקציה של $\frac{1}{\lambda_0}$.

(9 נקודות)

ג. (1) מצא על פי הגרף את קבוע פלנק. פרט את חישוביך.

(2) מצא על פי הגרף את אורך הגל המקסימלי שעבורו תתקבל פליטת

אלקטרונים מן המשטח הפולט. פרט את שיקוליך ואת חישוביך.

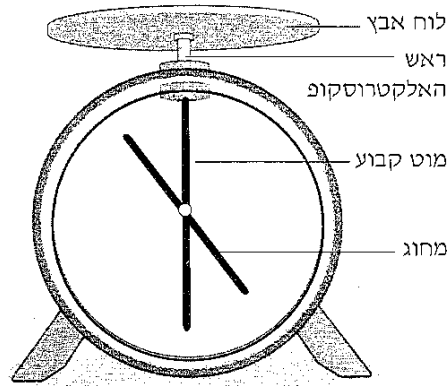
(12 נקודות)

ד. הסבר מדוע קיים אורך גל מקסימלי שעבורו תתקבל פליטת האלקטרונים מן

המשטח הפולט. ($\frac{1}{3}$ נקודות)

4. אלקטרוסקופ הוא מתקן לבדיקת מטען של גופים שונים. לאלקטרוסקופ שני חלקים עיקריים. חלק אחד הוא מוט מתכת הקבוע במקומו, כך שהקצה העליון של המוט – "ראש" האלקטרוסקופ – בולט מעל גוף האלקטרוסקופ. החלק האחר הוא מחוג עשוי ממתכת המחובר במרכזו למוט הקבוע, והוא צמוד אליו כאשר האלקטרוסקופ אינו טעון. כאשר מביאים גוף טעון במגע עם "ראש" האלקטרוסקופ – האלקטרוסקופ נטען, ומחוג האלקטרוסקופ סוטה ממצבו האנכי, ונוצרת זווית גדולה מאפס בין המחוג ובין המוט הקבוע. תלמיד ערך חמישה ניסויים, כמפורט להלן.

א. בניסוי הראשון הרכיב התלמיד על "ראש" האלקטרוסקופ לוח אבץ, וטען את האלקטרוסקופ במטען חשמלי שלילי (ראה תרשים), ומחוג האלקטרוסקופ סטה.



אלקטרוסקופ

לאחר מכן כיוון התלמיד פנס שפלט קרינה על-סגולה על לוח האבץ. בדיוק ברגע שהקרינה פגעה בלוח האבץ, החלה פריקת האלקטרוסקופ, והסטייה של מחוג האלקטרוסקופ הלכה וקטנה.

הסבר את התופעה. (6 נקודות)

ב. בניסוי השני הגדיל התלמיד את המרחק בין הפנס לבין לוח האבץ, וערך שוב את הניסוי הראשון.

ג. בניסוי השלישי טען התלמיד את האלקטרוסקופ במטען חשמלי חיובי, ורק לאחר מכן הקרין באותו פנס שהשתמש בו קודם (בניסוי הראשון והשני).

לאחר ההקרנה הסטייה של מחוג האלקטרוסקופ לא השתנתה (האלקטרוסקופ לא נפרק). הסבר מדוע. (6 נקודות)

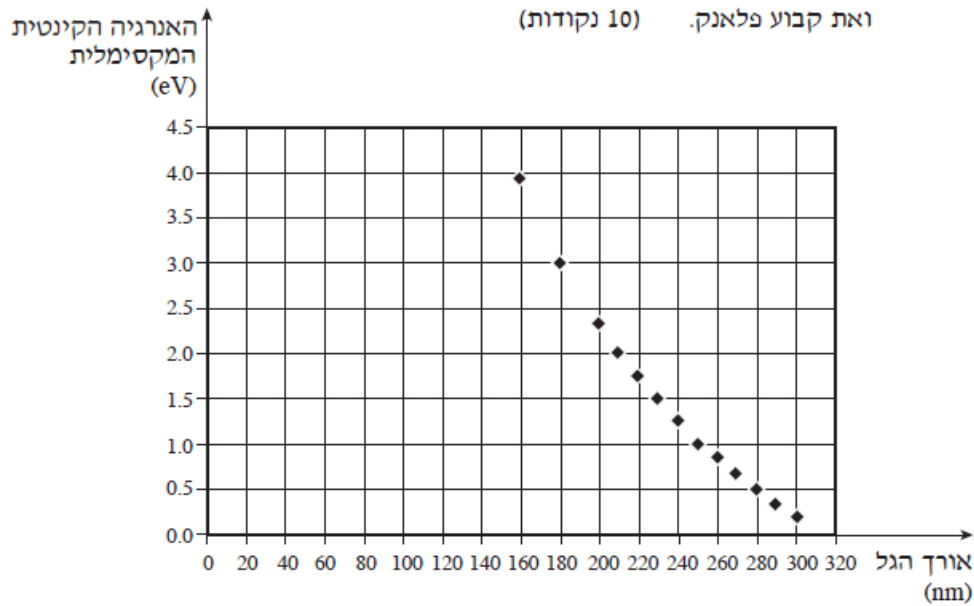
ד. בניסוי הרביעי טען התלמיד את האלקטרוסקופ במטען חשמלי שלילי, וכיוון אל לוח האבץ פנס הפולט אור נראה. הסטייה של מחוג האלקטרוסקופ לא השתנתה. ציין סיבה אפשרית לכך. (6 נקודות)

ה. בניסוי החמישי הסיר התלמיד את לוח האבץ והרכיב במקומו לוח ברזל, טען את האלקטרוסקופ במטען שלילי, וכיוון אל לוח הברזל את הפנס שהשתמש בו בניסוי הראשון הפולט קרינה על-סגולה. הסטייה של מחוג האלקטרוסקופ לא השתנתה.

4. עורכים ניסוי בתא פוטואלקטרי ומאירים את הפולט (הקתודה) באלומות מונוכרומטיות של קרינה על-סגולה, בזו אחר זו. האלומות שונות זו מזו באורכי הגל שלהן. לכל אלומה מודדים את האנרגיה הקינטית המקסימלית של האלקטרונים שנעקרים. א. מסרטטים גרף של האנרגיה הקינטית המקסימלית של האלקטרונים הנעקרים, כפונקציה של אורך הגל של האלומות הפוגעות. קבע על סמך התאוריה, אם גרף זה צפוי להיות ליניארי. נמק את קביעתך. (6 נקודות)

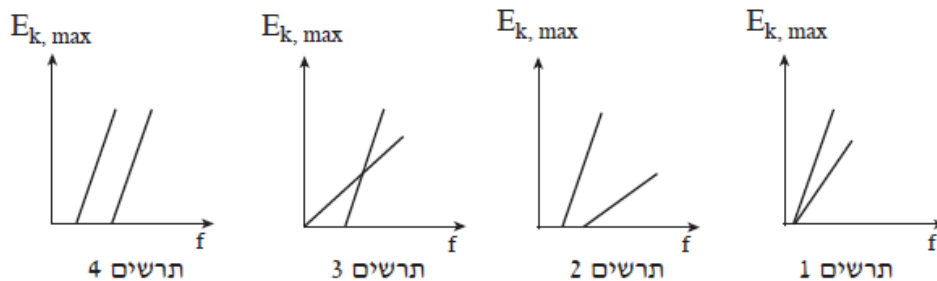
ב. הגרף שלפניך מציג את האנרגיה הקינטית המקסימלית של האלקטרונים הנעקרים, כפונקציה של אורך הגל של האלומה הפוגעת, כפי שהתקבלה בניסוי.

בחר בשתי נקודות מהגרף, וחשב בעזרתן את פונקציית העבודה של המתכת המוארת ואת קבוע פלאנק. (10 נקודות)

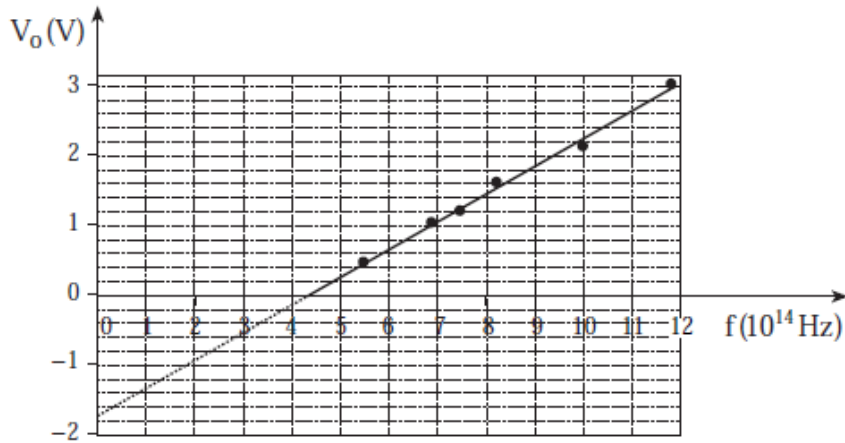


ג. הגדר את המושג "מתח עצירה", וחשב את גודלו של מתח העצירה הדרוש כאשר מאירים את הפולט של התא בקרינה בעלת תדירות $1.25 \cdot 10^{15}$ Hz. השתמש בערך של קבוע פלאנק שקיבלת בסעיף ב. (10 נקודות)

ד. בחלק האחרון של הניסוי משתמשים בשני תאים פוטואלקטריים שונים, ומסרטטים במערכת צירים אחת עבור שני התאים את הגרפים של האנרגיה הקינטית המקסימלית $E_{k, max}$ של האלקטרונים הנעקרים, כפונקציה של תדירות הקרינה f . איזה מהתרשימים 1-4 שלפניך מציג נכון את תוצאות הניסוי? הסבר. (7 $\frac{1}{3}$ נקודות)



4. בניסוי לחקר האפקט הפוטואלקטרי, הטילו אלומות קרינה מונוכרומטיות, בזו אחר זו, על הפולט (קתודה) של תא פוטואלקטרי העשוי מנתרן, ומדדו את המתח העוצר, V_0 . האלומות נבדלות זו מזו בתדירותן, f . לפיכך גרף של המתח העוצר, V_0 (הנמדד בוולטים), כפונקציה של התדירות, f , ביחידות 10^{14} Hz.



א. מצא את פונקציית העבודה של נתרן. (4 נקודות)

ב. בטבלה שלפניך מוצגים שלושה מקרים.

תדירות הקרינה הפוגעת (Hz)	המתח בין הפולט לקולט $V_{\text{פולט}} - V_{\text{קולט}}$	
$3 \cdot 10^{14}$	- 0.5	מקרה (1)
$8 \cdot 10^{14}$	0.7	מקרה (2)
$8 \cdot 10^{14}$	2.8	מקרה (3)

ענה על הסעיפים i-iii, בנוגע לכל אחד מהמקרים (1)-(3).

- i קבע אם אלקטרונים נפלטים או אינם נפלטים מן הפולט. הסבר.
- ii אם אלקטרונים נפלטים מן הפולט, קבע אם הם יכולים לפגוע בקולט או אינם יכולים לפגוע בו. הסבר.
- iii אם אלקטרונים נפלטים מן הפולט אך אינם פוגעים בקולט, קבע אם צריך להגדיל את המתח $V_{\text{קולט}} - V_{\text{פולט}}$ או להקטין אותו, כדי שהאלקטרונים הנפלטים יגיעו אל הקולט. הסבר.

(24 נקודות)

ג. ציין תופעה הקשורה לאפקט הפוטואלקטרי שאי אפשר להסביר אותה באמצעות מודל הגלים האלקטרומגנטיים של האור. נמק. (5 $\frac{1}{3}$ נקודות)

3. מקור אור שהספקו 0.6 W פולט קרינה מונוכרומטית בקצב של 10^{18} פוטונים שנייה.

א. חשב את האנרגיה של פוטון אחד. (12 נקודות)

אלומת הפוטונים שמקור האור פולט פוגעת בקתודה של תא פוטו-אלקטרי,

שפונקציית העבודה שלה היא $4.8 \cdot 10^{-19} \text{ J}$.

הנח כי 3% מהפוטונים הנפלטים מהמקור גורמים לפליטת אלקטרונים מהקתודה.

ב. חשב את האנרגיה הקינטית המקסימלית של האלקטרונים הנפלטים מהקתודה.

(10 נקודות)

ג. חשב את גודלה של המהירות המקסימלית של האלקטרונים הנפלטים מהקתודה.

(10 נקודות)

ד. חשב את המתח העוצר בתא. (8 נקודות)

השנה (2005) מציינים בעולם את שנת הפיזיקה, במלאת מאה שנה לפרסום מאמרו

המהפכניים הראשונים של אלברט איינשטיין.

באחד מהמאמרים הסביר איינשטיין את האפקט הפוטו-אלקטרי על ידי תיאור הקרינה

האלקטרו-מגנטית כ"זרם פוטונים".

ה. הסבר בעזרת תיאור זה –

(1) כיצד משפיעה תדירות הקרינה הפוגעת על פליטת אלקטרונים בתא

פוטו-אלקטרי. (5 נקודות)

(2) כיצד משפיעה עוצמת הקרינה הפוגעת על פליטת אלקטרונים בתא

פוטו-אלקטרי. (5 נקודות)