



תופעות המלוות את האפקט הפוטואלקטרי בניסוי לחישוב קבוע פלאנק

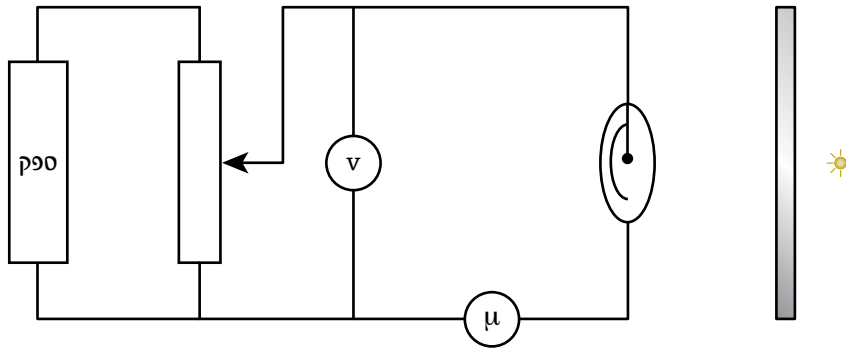
יבגניה גבאי, אלכס פלטקוב, מתן פרלמן, תיכון רב-תחומי "שבח מופת" רשת עמל, ו"והנה ז'בוטינסקי" רשת עתיד

תקציר: בניסוי חובה שמבצעים במסגרת לימודי פיזיקה, "קביעת קבוע פלאנק באפקט הפוטואלקטרי", התוצאות אינן משביעות רצון, שכן שיעור קבוע פלאנק יוצא באופן שיטתי כחצי מערכו המופיע במדריכים. בניסוי גילינו גם שמתח העצירה בהקרנה באור לבן **קטן** ממתח העצירה שמקבלים בהקרנה של תא פוטואלקטרי דרך מסנן סגול. בעבודה זו עסקנו בסיבות האפשריות לכך, ואנו ממליצים כיצד כדאי לבצע את הניסוי על מנת לקבל תוצאות מדויקות יותר.

ניסוי מיליקן

נזכיר קצת את ההיסטוריה של ניסוי מיליקן.

כאשר איינשטיין פרסם את ההסבר שלו לאפקט הפוטואלקטרי, רבים מהפיזיקאים התייחסו להסבר בסקפטיות. אחד מהם היה רוברט מיליקן, שעשה ניסוי על מנת להוכיח שאיינשטיין טועה. הוא לקח תא פוטואלקטרי, נגד משתנה, מקור מתח משתנה, וולטמטר ואמפרמטר, מקור אור ומסנני אור.

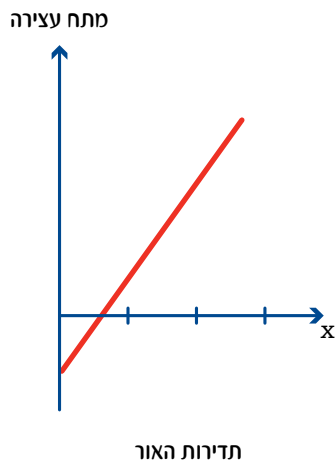


איור 1: תרשים סכמתי של מערך הניסוי

בכל שלב בניסוי החליף מיליקן את המסנן (כלומר, את התדירות של האור המגיע לתא הפוטואלקטרי), ועל ידי הנגד המשתנה חיפש מצב שבו הזרם שווה ל-0 (ומכאן שהמתח הוא מתח העצירה).

מטרתו של מיליקן הייתה להוכיח שהקשר $u_c = \frac{h}{|q_e|} \nu - \frac{B}{|q_e|}$ (1) אינו מתקיים. לאחר ביצוע הניסוי שרטט מיליקן גרף של מתח עצירה כפונקציה של תדירות האור.

מיליקן למעשה קיבל גרף ליניארי, תוצאה שהפתיעה אותו מאוד שכן היא תומכת בהסבר של איינשטיין. מה שהפתיע אותו עוד יותר הוא שיפוע הגרף, שממנו בחישוב קבוע פלאנק, לפי הנוסחה שפיתח איינשטיין, מתקבלת תוצאה כמעט מדויקת. כך למעשה אישש מיליקן את ההסבר של איינשטיין לאפקט הפוטואלקטרי.

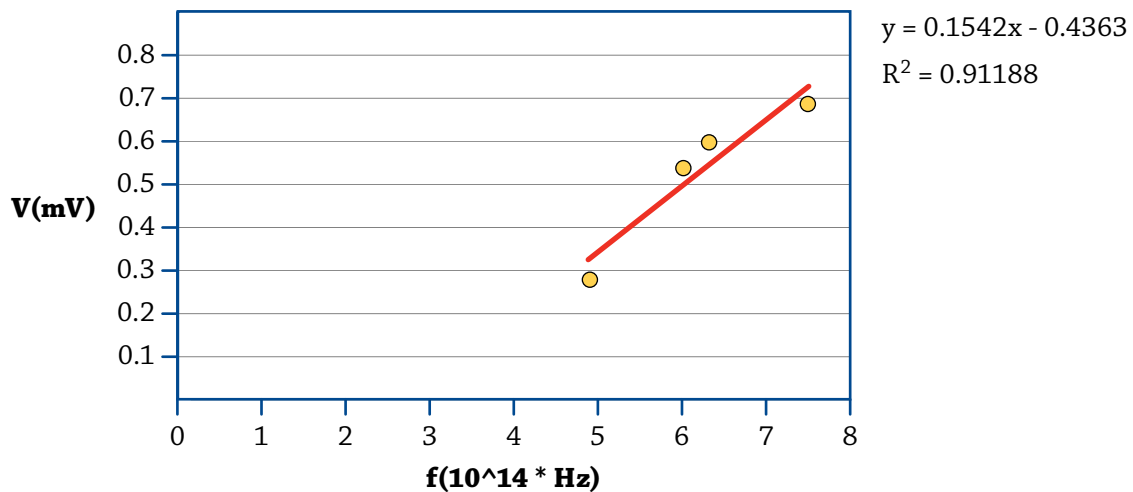


איור 2: סכמת הגרף המתאר את התוצאות שקיבל מיליקן

מדוע אנחנו (כאשר אנו חוזרים על ניסוי מיליקן בערכת הניסוי שקיימת בבתי הספר) איננו מקבלים תוצאות משביעות רצון? אולי מספר המסננים קטן מדי? אולי מכשירי המדידה אינם מדויקים מספיק?

הגדלת מספר המסננים

במסגרת לימודי הפיזיקה בבתי הספר נעשה ניסוי דומה לניסוי מיליקן. בניסוי משתמשים בארבעה מסננים, תא פוטואלקטרי ושאר הרכיבים המופיעים בניסוי שערך מיליקן. מטרת הניסוי היא לחשב את קבוע פלאנק מתוך תוצאות ניסוי (גרף 1). למעשה, בתוצאות ניסוי זה מתגלה בעיה: ערכו של קבוע פלאנק המחושב לפי תוצאות הניסוי הוא: $h = 2.46 \cdot 10^{-34} \text{J}\cdot\text{s}$ - ערך הקטן משמעותית מהערך האמתי שלו.

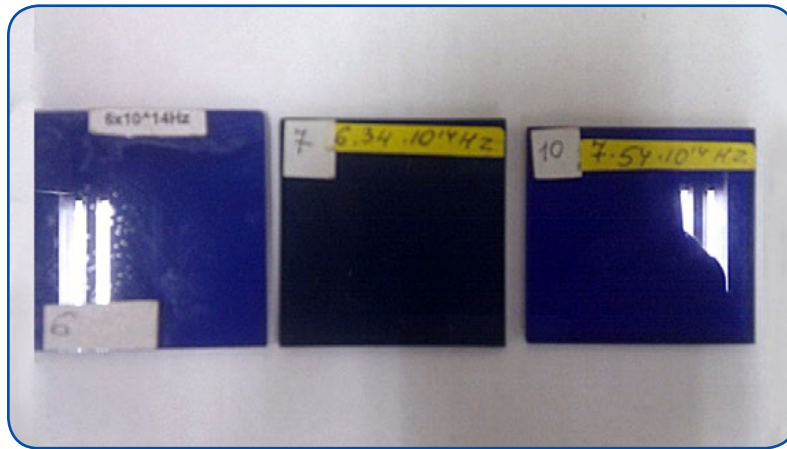


גרף 1: ניסוי האפקט הפוטואלקטרי: תלות מתח העצירה בתדירות האור

מכאן רואים שההפרש בין הקבוע המחושב לקבוע כפי שהוא מופיע במדריכים גדול מדי.

על מנת לענות על השאלה מדוע נוצר ההפרש הזה, ניסינו לשנות מספר גורמים בניסוי. ראשית, שיפרנו את כל מכשירי המדידה, כולל הוספת ריאוסטט שמאפשר לשנות את המתח הנגדי בצורה עדינה מאוד. תוצאות הניסוי השתנו, אך לא במידה משמעותית.

בשלב הבא החלטנו להגדיל את מספר המסננים בניסוי. לקחנו עשרה מסננים בעלי תדירויות שונות לאורך כל הספקטרום של האור הנראה. מסנן אחד סגול היה "חלבי", כלומר, לא שקוף לחלוטין, ולכן הוחלט לא להכניסו לניסוי, ונשארנו רק עם תשעה מסננים. בנוסף הבחנו בשלב מסוים כי התדירויות הרשומות על המסננים בעייתיות. כך לדוגמה, תדירות של מסנן ירוק נמצאת בין תדירות של שני מסננים כחולים. ראו תמונה 1 המציגה צילום של שלושה מסננים: באמצע - מסנן ירוק ובצדדים - מסננים כחולים.



תמונה 1: דוגמאות למסנני אור שבהם השתמשנו בניסוי

בתמונה 1 רואים כי על מסנן בעל צבע ירוק (מסנן מס' 7) רשומה תדירות גבוהה יותר מאשר על מסנן בעל צבע כחול (מסנן מס' 6).

בנוסף עלתה האפשרות לאי-דיוק בתדירויות הרשומות על המסננים. הייתכן שאי-דיוק זה גרם לאי-דיוק כה גדול בערכו של קבוע פלאנק? החלטנו לבדוק את התדירויות הרשומות על המסננים.

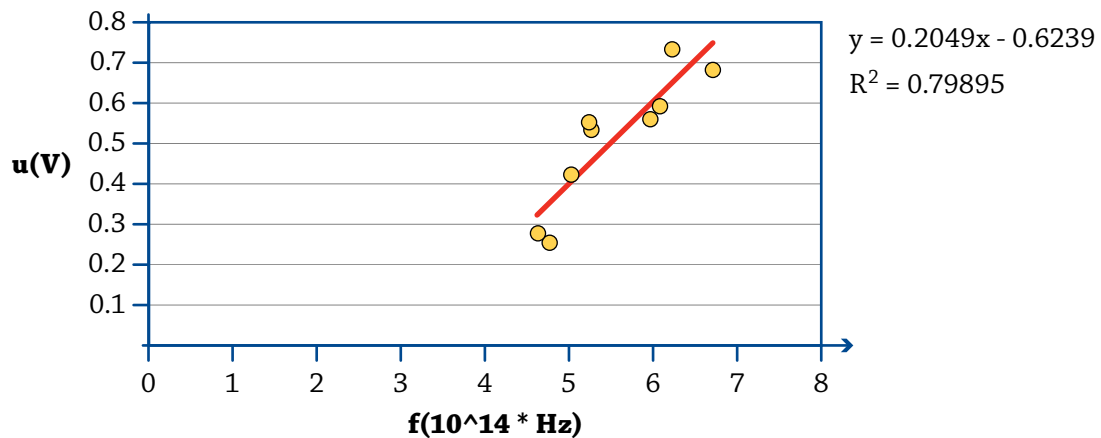
לשם כך שלחנו את המסננים למכון ויצמן, לבדיקת ספקטרום הבליעה של כל מסנן. לאחר קבלת התוצאות וחישוב תדירויות לפי ספקטרום הבליעה, ביצענו את ניסוי מיליקן והפעם עם יותר מסננים ועם ערכים מדויקים יותר של תדירויות האור שהם מעבירים. תוצאות החישובים מספקטרום הבליעה והנתון שכתוב ע"י מייצר המסננים (תדירות רשומה?) מופיעים בטבלה 1.

טבלה 1: טבלת רשימת תדירויות של המסננים

מספר מסנן	צבע	תדירות רשומה $f(*10^{14} \text{ Hz})$	תדירות מדודה $f(*10^{14} \text{ Hz})$
1	סגול חלבי	6.1	-
2	ירוק	5.68	5.97
3	אדום בהיר	4.6	4.77
4	כתום	4.98	5.03
5	צהוב	5.53	5.24
6	כחול	6.00	6.22
7	ירוק-כחול	6.34	6.08
8	אדום כהה	4.91	4.63
9	צהוב	6.05	5.26
10	סגול	7.54	6.72

כפי שאפשר לראות, קיים הבדל בין התדירות המדודה לבין מה שכתוב על המסננים.

בגרף 2 מופיעות תוצאות הניסוי עם תשעה מסננים עם תדירויות שחישבנו מספקטרום הבליעה כאשר התא הפוטואלקטרי צמוד למקור.



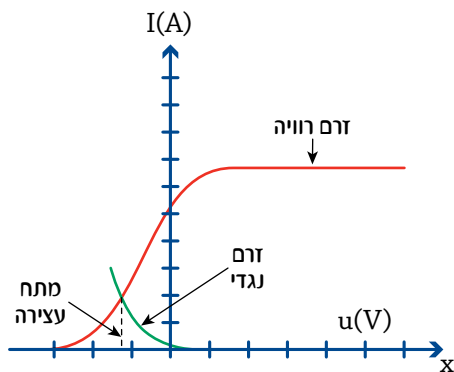
גרף 2: תוצאות הניסוי לאחר הוספת מסננים

מחישוב על סמך תוצאות הניסוי מתקבל קבוע פלאנק שערכו: $h = 3.278 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$

כמו שרואים גם פה, השיפור בקבוע פלאנק אינו משמעותי. אך מהגרף הזה רואים בוודאות שהגרף "נשבר" באזור תדירות $5.5 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$, כי הקו העובר דרך הנקודות עד התדירות הזו הוא בעל שיפוע תלול יותר מאשר הקו העובר דרך 4 הנקודות הבאות. בשבירת הגרף הבחנו בכל הניסויים שערכנו.

בנוסף לבעיה הנוגעת לערכו של קבוע פלאנק, גילינו בעיה נוספת - **מתח העצירה של אור לבן יוצא נמוך יותר ממתח העצירה של אור עם מסנן סגול**: בהקרנת התא הפוטואלקטרי באור לבן מתח העצירה הוא 0.657 V , ואילו בהקרנת התא הפוטואלקטרי באור סגול מתח העצירה הוא 0.682 V . הדבר מפתיע כי הרי אור לבן כולל תדירויות גבוהות יותר מאשר אור סגול. דבר זה אינו עולה בקנה אחד עם נוסחת איינשטיין שלפיה מתח העצירה פרופורציונאלי לתדירות (אור לבן כולל בתוכו גם תדירות של מסנן סגול וגם תדירויות גבוהות ממנה).

זרם נגדי מהקולט

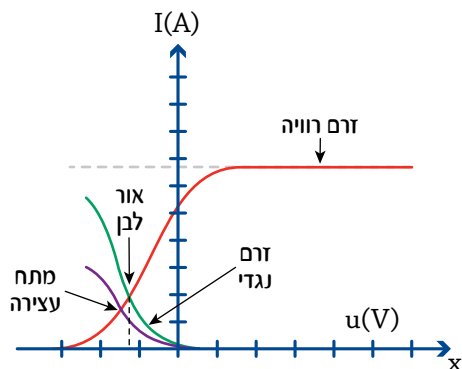


איור 3: המחשת התנהגות של הזרמים מהקולט לפולט ומהפולט לקולט

בשלב זה העלינו השערה שהפער בין ערכו של קבוע פלאנק המתקבל בניסוי לבין ערכו האמתי, נובע מהופעת זרם נגדי מהקולט אשר נוצר כאשר התדירויות של האור הפוגע בקולט גדולות יותר מתדירות הסף של הקולט. על רעיון זה מצביעה העובדה שהחל מתדירות מסוימת שיפוע הגרף נשבר: שיפוע דרך 5 נקודות מצד שמאל של איור 2 תלול יותר מאשר שיפועו דרך 4 נקודות הבאות מצד ימין. למעשה, השימוש במסננים רבים וגילוי שבירת הגרף רמז לנו שבסביבת תדירות ה"שכירה" קרה משהו, ושיעורנו שדבר זה נובע מקיום זרם נגדי מהקולט שתדירות הסף שלו נמצאת קרוב לתדירות שבירת הגרף¹. כאשר נוצר זרם נגדי כזה, הזרם מתאפס לפני שהמתח מגיע למתח העצירה האמתי, ומכיוון שהאמפרמטר

1 לאחר שהעלינו השערה זו, הופנתה תשומת לבנו למאמר (מאמר[5]) שבו מצוינת תופעת הזרם הנגדי (Reverse Current), ואנחנו מודים לד"ר ירון להבי וד"ר חנה ברגר על ההפנייה למאמר זה

רק מראה מצב שבו הזרם שווה לאפס, המתח שנמדד יוצא קטן יותר. משום שהמתח קטן יותר, שיפוע הגרף המשוורטט (מתח עצירה כפונקציה של התדירות) קטן יותר, ולכן קבוע פלאנק יוצא קטן יותר מערכו האמתי (ראו איור 3).



איור 4: המחשת הסבר של היפוך מתח העצירה בתחום התדירויות הגבוהות של האור הנראה

בעזרת רעיון זה ניתן להסביר גם את בעיית מתח העצירה של אור סגול לעומת מתח העצירה של אור לבן. בהנחה שאכן קיים הזרם הנגדי, המתח המחושב הוא כאשר הזרם הנגדי וההפוך שווים ויכול להיות מצב שבו החיתוך שלהם אצל אור סגול מתרחש לפני זה של אור לבן, ולכן מתח העצירה המתקבל לאור סגול גדול מזה של אור לבן (ראו איור 4).

כמו שרואים באיורים 3 ו-4, קיומו של זרם נגדי מסביר את שתי התופעות: גם הקטנת גודלו של קבוע פלאנק בניסוי וגם היפוך מתח העצירה בהקרנה באור לבן ובאור סגול.

הקטנת כמות הפוטונים הנפליים מהאנודה

על מנת לבחון את הרעיון של קיום הזרם הנגדי החלטנו למצוא דרך להקטין את כמות הפוטונים הנפליים מהקולט. הנחנו כי בהקטנת כמות הפוטונים הפוגעים בקולט, יפלטו ממנו פחות פוטואלקטרונים, והזרם הנגדי יקטן. כתוצאה מכך הסכום של הזרם מהפולט לקולט והזרם הנגדי יהיה קרוב יותר לזרם המקורי ומכאן קבוע פלאנק יצא קרוב יותר לערכו האמתי. שיערנו כי בעת הרחקת התא הפוטואלקטרי ממקור האור, פחות פוטונים יוחזרו מהקתודה, וכך תיפתר הבעיה. לפיכך בדקנו את השפעת המרחק בין מקור האור ובין התא הפוטואלקטרי על מתח העצירה. ביצענו את הניסוי עם תשעת המסננים במרחקים שונים מהתא (במרחקים של 0 ס"מ, 5 ס"מ, 10 ס"מ, 15 ס"מ ו-20 ס"מ). בניסויים אלה התברר שבמרחקים של 10 ס"מ ומעלה ממקור האור מתח העצירה של אור לבן היה גדול מזה של האור הסגול (היפוך מתח העצירה בתחום תדירויות גבוהות של אור הנראה).

טבלה 2: תלות מתח העצירה של אור לבן, אור סגול וקבוע פלאנק במרחק בין מקור האור ובין התא הפוטואלקטרי

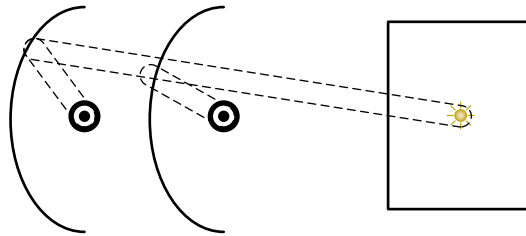
מרחק (ס"מ)	0	5	10	15	20
מתח (V) צבע לבן	0.657	0.771	0.855	0.935	0.973
מתח (V) צבע סגול	0.682	0.783	0.842	0.903	0.917
$h(*10^{-34}J*s)$	2.88	3.02	3.15	3.24	3.28

מתוצאות הניסוי אפשר להסיק שבהחלט הצלחנו להקטין את הזרם הנגדי שבא לידי ביטוי גם בהגדלת מתח העצירה מהמרחק. כמו כן ערכו של קבוע פלאנק עלה יותר ויותר ככל שהגדלנו את המרחק בין מקור האור לתא הפוטואלקטרי, אך עדיין יצא נמוך בהרבה מערכו המדויק כפי שמופיע במדריכים. מכאן הסקנו שיש השפעה של המרחק על מתח העצירה בכלל ועל קבוע פלאנק בפרט, אם כי ההשפעה על קבוע פלאנק אינה משמעותית. ממסקנה זו אפשר להבין כי עדיין קיים זרם נגדי.

אך מכאן נובעת בעיה נוספת. הרי כמות הפוטואלקטרונים הנפליים מהפולט קטנה, ומכיוון שמקדם החזרה תלוי רק בזווית הפגיעה ואינו תלוי במרחק, המקדם נשאר קבוע בזווית הפגיעה אשר קרובה לאפס (כלומר, היחס שבין כמות הפוטונים הפוגעים בקתודה לבין הפוטונים המוחזרים נשאר קבוע), והזרם היה צריך להתאפס באותו מתח. אז מדוע נקודת איפוס הזרם זהה? למה יחס הזרמים מהפולט ומהקולט מוקטן?

התשובה לכך היא שלמרות שהיחס שבין כמות הפוטונים המוחזרים מהפולט לפוטונים הפוגעים בו נשאר קבוע, כמות הפוטונים המגיעים לקולט תהיה קטנה יותר.

הגענו למסקנה שההסבר לכך הוא גאומטרי. סביר להניח שלמרות שבתאוריה מקור האור נמצא מול הפתח ומקרין את הפולט בזווית הפגיעה 0, במציאות יש סטייה קטנה מהמרכז, אשר גורמת להקטנת מספר הפוטונים המגיעים לקולט בהגדלת המרחק בין מקור האור ובין התא הפוטואלקטרי (איור 5).

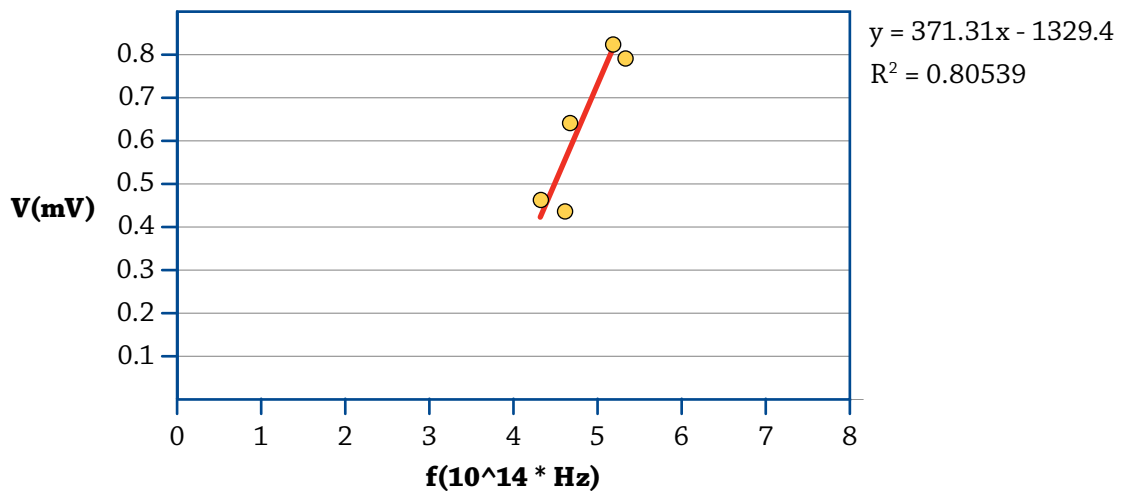


איור 5: השפעת מיקום מקור האור על כמות הפוטונים הפוגעים בקולט

מאיור 5 אפשר לראות בבירור כי ככל שהתא הפוטואלקטרי רחוק יותר ממקור האור, פחות פוטונים חוזרים לכיוון הקולט, ולכן יש פחות זרם נגדי - ומכאן שהתוצאה יוצאת מדויקת יותר ויותר. האם קיימות אפשרויות נוספות להסביר את התופעה? את הדבר הזה לא בדקנו. אנו מקווים שאולי מישהו יתעניין בנושא ויבדוק אפשרויות נוספות.

כיצד ניתן לשפר בצורה משמעותית את תוצאות הניסוי בקביעת קבוע פלאנק?

מהחקר שערכנו נובע שכדי לקבל תוצאות אמינות מניסוי מיליקן ולקבוע מהו קבוע פלאנק מדויק יותר, צריך לבצע את הניסוי בתדירויות גבוהות יותר מתדירות הסף של הפולט קטנות יותר מתדירות הסף של הקולט. לכן כדי לחשב את קבוע פלאנק מהניסוי השארנו רק נקודות לפני שבירת השיפוע בגרף 2. כאמור, שבירת הגרף מופיעה באזור תדירות של $5.5 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$. לכן השתמשנו רק בתדירויות עד לתדירות הזו. התוצאות מוצגות בגרף 3.



גרף 3: תוצאות הניסוי עבור תדירויות הנמוכות מתדירות הסף של הקולט

מחישוב קבוע פלאנק על פי הגרף מתקבל כי ערכו הוא: , ערך זה מהווה 89.7% מערכו המדויק של קבוע פלאנק.

צריך לציין שבשנת 2008 הייתה מעבדת חקר מוקדשת לקביעת קבוע של פלאנק באמצעות דיודות פולטות אור⁴. תוצאות הניסוי היו קרובות לערך של קבוע של פלאנק המופיעות במדריכים.

סיכום

1. המחקר שתואר במאמר זה עוזר להבין את האפקט הפוטואלקטרי בצורה עמוקה יותר וטובה יותר. זאת מכיוון שלמעשה האפקט הפוטואלקטרי מתרחש פעמיים: פעם אחת מתרחש האפקט כמתוכנן, מהפולט לקולט; ופעם שנייה - מעל תדירות הסף של הקולט ושלא כמתוכנן, משמע - מהקולט לפולט.
2. במחקר הועלה רעיון על קיום הזרם הנגדי מהאנודה אשר משפיע משמעותית על תוצאות הניסוי. מחקר זה יכול לספק הסברים שיעזרו להבין מדוע הערך של קבוע פלאנק המחושב על פי הניסוי נמוך משמעותית מהערך האמתי שלו.
3. במחקר מוסבר למה כאשר מקור האור מקרין את התא הפוטואלקטרי בצמוד אליו, מתח העצירה של אור לבן נמוך ממתח העצירה של אור סגול.
4. לאור תוצאות המחקר אפשר לנסח מספר המלצות למורים בביצוע הניסוי.
 - א. כדאי לבצע את הניסוי כאשר המרחק בין מקור האור לתא הפוטואלקטרי הוא יותר מ-10 ס"מ.
 - ב. תדירויות של המסננים המשתמשים בניסוי צריכות להיות קטנות מתדירויות של תדירות סף של האנודה.
 - ג. כדאי להשתמש בתא פוטואלקטרי עם הפרשי תדירויות סף של קתודה ואנודה גבוהים ככל האפשר.

ספרות

1. R.A. Millikan, Einstein's Photoelectric Equation. Phys.Rev. 7, 18, (1916)
2. Einstein, Albert (1905). "Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt". Annalen der Physik 17 (6): 132–148
3. A.H.Матвеев, Оптика, Москва, Высшая школа, 1985, 108
4. עדי רוזן, לקט מבחני בגרות פיזיקה - 5 יחידות לימוד 2009,
5. Steven R. Dabic, Determining h/e via the Photoelectric Effect, MIT Department of Physics (Dated: October 10, 2007)

ברכות לאסתי ומגן על כתיבתם בפנים ראשיתם לחינוך לכפר מקם ראוי - תשע"ה