

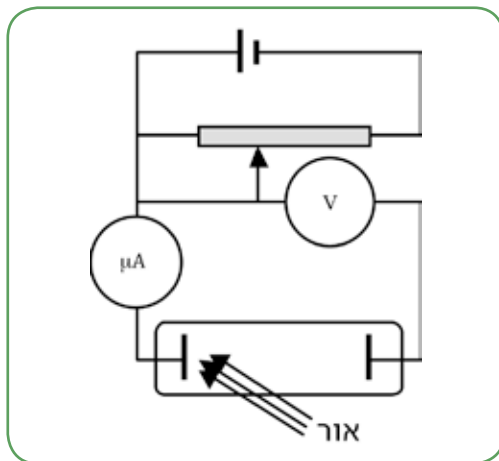
מן המטבח של מוטי ויוסף: האפקט הפוטואלקטרי

יוסף סוסונובסקי, מרדכי מושיצקי, מכון דוידסון לחינוך מדעי, מכון ויצמן למדע

מה חדש
במעבדה



האפקט הפוטואלקטרי וההסבר שניתן לו מהווים אבן פינה בהתפתחותה של הפיזיקה המודרנית ושל התפיסה החלקיקית העומדת בבסיסה של תורת הקוונטים. קיימות מערכות ניסוי רבות המאפשרות את מדידת התלות של מתח העצירה בתדירות האור הפוגע בשפופרת הפוטואלקטרית, וכולן מבוססות על המעגל החשמלי הבא:



איור 1: המעגל החשמלי בניסוי המקובל למדידת האפקט הפוטואלקטרי

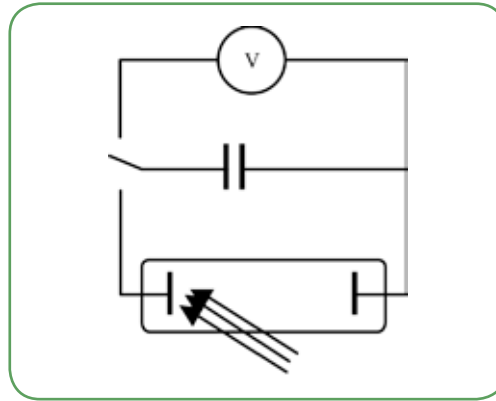
במערכת המתוארת באיור 1 משנים את המתח של מקור המתח החיצוני (בעזרת הנגד המשתנה) עד להתאפסות הזרם הנמדד על ידי מד הזרם. מצב זה, מצב ה"עצירה", שקול לחיבור בקיטוב הפוך של שתי סוללות זהות במעגל זרם ישר כאשר השפופרת הפוטואלקטרית שקולה למקור מתח. מדידת מתח המקור החיצוני במצב המתואר מאפשרת למדוד את מתח העצירה. מכאן שעל ידי שינוי אורך הגל של האור הפוגע באמצעות פילטרים, אפשר לאשש באופן ניסיוני את נוסחת איינשטיין המקשרת בין האנרגיה של האור הפוגע לבין האנרגיה המקסימלית של האלקטרונים הנפלטים כתוצאה מבליעת האור.

המערכת המתוארת מצויה במעבדות רבות ופועלת ביעילות טובה למדי. ואולם תלמידים רבים מתקשים בהרכבה ובהבנה של המערכת ושל התפקידים של רכיביה השונים, ובזה יש לעסוק עוד קודם שמטפלים בהבנת האפקט הפוטואלקטרי עצמו.

הביא לדפוס: ירון להבי מכון ויצמן למדע, בית הכרם, המכללה האקדמית לחינוך ע"ש דוד ילין

כדי לענות על קושי זה בנו יוסי ומוטי, הלבורנטים במכון דווידסון, מערכת פשוטה יותר המאפשרת אף היא לקבל תוצאות מצוינות אך ללא הסיבוך המצוי במערכת הסטנדרטית.

המערכת מבוססת על מעגל טעינה ופריקה של קבל כאשר מקור המתח הוא השפופרת הפוטואלקטרית ואין שימוש במקור מתח נוסף או במד זרם. לאחר שהקבל נטען, אין זרם במעגל, והמתח על הקבל שווה למתח העצירה. הווה אומר, המתח על הקבל הטעון שווה לכא"מ של השפופרת הפוטואלקטרית.



איור 2 : מערכת למדידת האפקט הפוטואלקטרי המבוססת על מדידת מתח על קבל

מהלך הניסוי

מצמידים את השפופרת הפוטואלקטרית למקור אור המכוסה בפילטר וטוענים את הקבל במשך כשתי דקות (ההתנגדות של השפופרת היא מסדר גודל של 0.5 עד 1 מגה אוהם, וקיבול הקבל הוא 10 מיקרופאראד).

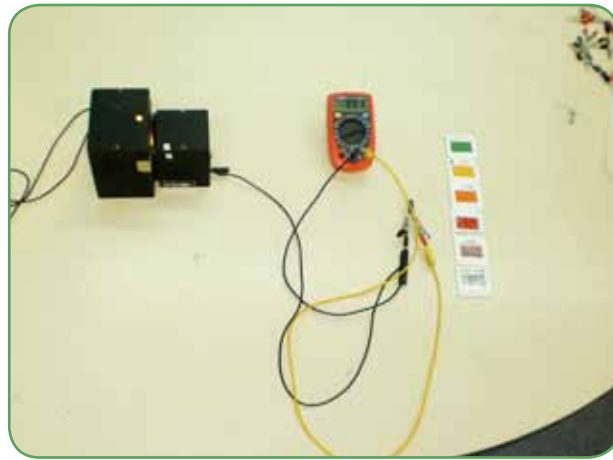


איור 3: טעינת הקבל על ידי מקור מתח פוטואלקטרי. לחוט השחור המחבר בין הקבל למד המתח אין תפקיד בטעינה, והוא נועד לשמש רק בשלב הבא, שלב הפריקה.

כעת מחברים את הקבל למד המתח (בניסוי שביצענו לא השתמשנו במתג אלא העברנו את החוט ממקור המתח - התא הפוטואלקטרי, אל מד המתח) ומוודים את המתח ההתחלתי (יש לשים לב שהמתח יורד, עדות לכך שמד המתח אינו אידיאלי והתנגדותו גדולה אבל סופית). חשוב שקבוע הזמן בעת פריקת הקבל (המכפלה של התנגדות מד המתח בקיבול הקבל) יהיה גדול על מנת שהפריקה שלו תהיה אטית והקריאה הראשונית תהיה מדויקת¹. בניסוי שערכנו השתמשנו

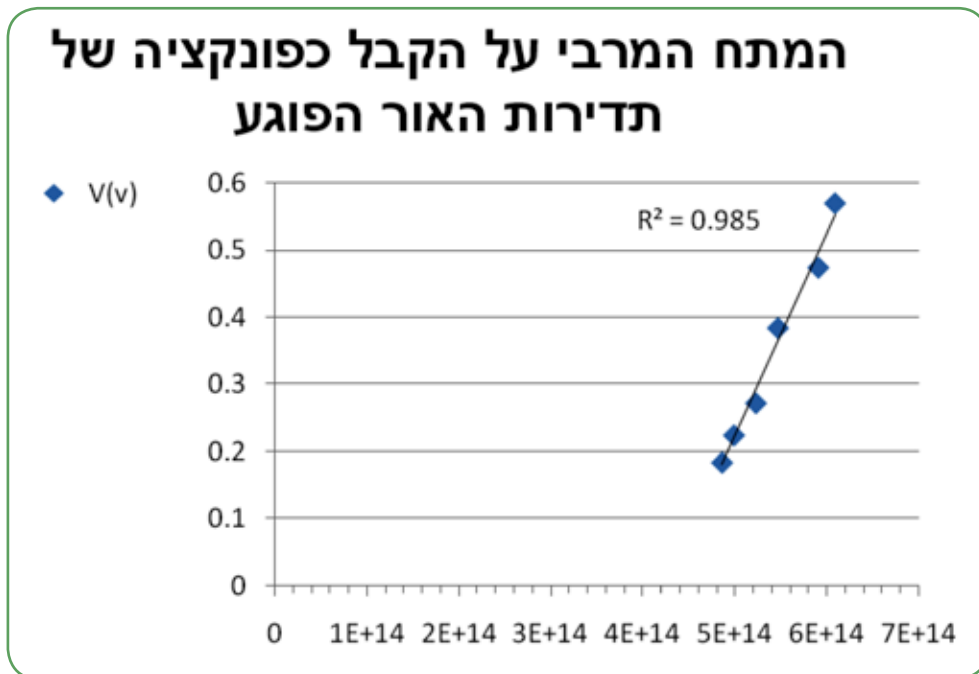
1 למד המתח זמן אופייני של עדכון צג המדידה של כ-3 שניות, ולכן יש חשיבות כפולה לכך שקבוע הזמן יהיה גדול על מנת שהקריאה תתאים למתח המרבי על הקבל.

במד מתח שהתנגדותו הפנימית היא כ- $10\text{M}\Omega$. המתח ההתחלתי הוא המתח המרבי שבו הקבל נטען על ידי מקור המתח (השפופרת הפוטואלקטרית), והוא שווה כאמור למתח העצירה. כעת מחליפים את הפילטר וחוזרים על המדידה. בגרף הבא מוצגות תוצאות המדידה של המתח המרבי על הקבל כפונקציה של תדירות האור הפוגע בתא הפוטואלקטרי:



איור 4 : פריקת הקבל דרך מד המתח. קריאת המתח ההתחלתי מורה כאן על 0.8 וולט

הערך המחושב של קבוע פלנק לפי תוצאות ניסוי זה הוא $5 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$. השוואת התוצאות שהתקבלו בניסוי זה לתוצאות



במערכת הרגילה מראה כי בשני המקרים מתקבלת תוצאה דומה עבור ערכו של קבוע פלנק עם מידה טובה יותר של דיוק למערכת המבוססת על הקבל בהשוואה למערכת הרגילה.

על ידי הרחקת מקור האור מן השפופרת, אפשר גם להראות לתלמידים כי המתח בין לוחות הקבל הטעון (ולכן מתח השפופרת) אינו תלוי בעצמת האור הנבלע.

- בנוסף אפשר להראות במערכת כי אם תדירות האור הנבלע בשפופרת היא מתחת לערך מסוים (תדירות הסף), הרי שגם אם נגדיל את עצמת האור וגם אם נמתין זמן רב - הקבל לא ייטען. בהמשך אפשר לדון עם התלמידים בשאלות האלה:
1. האם במצב זה בליעת האור יוצרת מתח בשפופרת או לא;
 2. מה המשמעות של אי טעינת הקבל בכל הנוגע לפליטת האלקטרונים בשפופרת.

סיכום

המערכת המוצעת כאן מבוססת על הרעיון שלפיו התא הפוטואלקטרי מהווה בעצם מקור מתח שהכא"מ שלו מקורו באנרגיה של האור הנבלע בו ולפיכך חקירת כא"מ זה מאפשרת לחקור מבחינה אנרגטית את תהליך בליעת האור. לפי תוצאת הניסוי, הכא"מ מתכונתי לתדירות של האור הנבלע בו ומכאן אפשר לקבל את נוסחת אינשטיין.

לכאורה, מדידת הכא"מ של התא הפוטואלקטרי הייתה יכולה להיעשות על ידי חיבור של מד מתח לשני קצות התא ללא שום צורך בקבל. ואולם במקרה כזה לא היו מתקבלות התוצאות הרצויות, מאחר שמד המתח אינו אידאלי והתנגדותו היא סופית.

למערכת המוצעת מספר יתרונות. הוויתור על המעגל הפוטנציומטרי מפשט את ההרכבה וההבנה של המעגל החשמלי והופך את המדידה של מתח העצירה לישירה.

אם מתייחסים לשפופרת הפוטואלקטרית כאל מקור מתח ולמעגל החשמלי כאל מעגל טעינה רגיל, מקבלים הסבר פשוט שאומר כי עם סיום הטעינה של הקבל, המתח עליו שווה למתח המרבי הנוצר בגלל בליעת האור בשפופרת הפוטואלקטרית. לכן קל גם להסביר כי ערכו הנמדד של המתח על הקבל עם סיום הטעינה מתכונתי לאנרגיה ליחידת מטען שנוספה לאלקטרונים בתהליך הבליעה של האור.