

חוקרים: האפקט הפוטואלקטרי

שכבת גיל
חטיבה עליונה – כיתה י"ב

תקציר הפעילות

בפעילות זו ייעזרו התלמידים בסימולציה של האתר PhET, המדמה את הניסוי שערך רוברט מיליקן בשנת 1916. מטרתו של מיליקן הייתה לחקור את האפקט הפוטואלקטרי ולאשש את נוסחת איינשטיין. הפעילות מתאימה ליחידים או זוגות. בסוף הפעילות ישנה הפניה לבחינת בגרות ובה שאלה שקשורה לנושא.

משך הפעילות

הפעילות מומלצת לשיעור כפול.

מטרות הפעילות

- להכיר את ניסוי מיליקן לחקירת האפקט הפוטואלקטרי.
- לבחון את המודל של איינשטיין להסבר האפקט הפוטואלקטרי.

מושגים מתוכנית הלימודים

פוטון, קרינה וחומר, האפקט הפוטואלקטרי, תא מיליקן, זרם רוויה, מתח עצירה, נוסחת איינשטיין

מיומנויות

שאלת שאלות, עיבוד נתונים, ניתוח נתונים והסקת מסקנות, הבניית ידע, השערת השערות

אופי הלמידה

- יחידים
- זוגות

סוג הפעילות

- פעילות מחליף ניסוי
- פעילות לסיכום הנושא

קישור לסרטונים ולכתבות

- "הפוטון": <https://bit.ly/2lyB0dx>
- כתבה – "חלקיקי החומר – הפוטון": <http://goo.gl/pQbPQ>
- כתבה – "המתכות היקרות של הטבלה המחזורית": <https://bit.ly/3boDDDa>

הכנות לקראת הפעילות

- פעילות זו מדמה ניסוי שמאפשר חקירה של האפקט הפוטואלקטרי. תוצאות ההדמיה מתיישבות עם המודל החלקיקי של האור (הפוטונים). פעילות זו יכולה להיות סיכום לנושא. לפני ביצוע הפעילות מומלץ שלתלמידים יהיה רקע בנושא "האפקט הפוטואלקטרי".
- הפעילות ארוכה יחסית, לכן מומלץ לשריין בעבודה שיעור כפול.
- יש לשריין חדר מחשבים.
- יש להתקין את ההדמיה של אתר PhET במחשב האישי ובאמצעות הקישור הבא:
<https://phet.colorado.edu/en/simulation/photoelectric>
- ההדמיה ממחישה לתלמידים בצורה חזותית את התהליך, ומאפשרת להם לבצע שינויים, כגון: שינוי תדירות האור הפוגע בקתודה, שינוי עוצמת האור הפוגע בקתודה, בחירת סוג המתכת שממנה עשויה הקתודה, או המתח בין האנודה לקתודה. בעזרת שינויים אלה אפשר לחקור וללמוד כיצד מתיישב המודל החלקיקי של האור עם האפקט הפוטואלקטרי.
- במידת הצורך, יש להתקין תוכנת JAVA שתאפשר את הרצת ההדמיה, בעזרת הקישור הבא:
[/https://java.com/en/download](https://java.com/en/download)

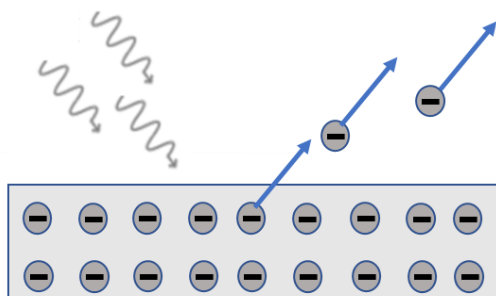
מה עושים?

מבוא – הכרת הפוטון

· צפו בסרטון המבוא שמתאר את הפוטון ותכונותיו: <https://bit.ly/2lyB0dx>

רקע מדעי לפעילות

האפקט הפוטואלקטרי: תופעה שבה אלקטרונים נעקרים מפניה של מתכת על ידי קרינה אלקטרומגנטית שפוגעת במתכת (תרשים א').



תרשים א' – האפקט הפוטואלקטרי

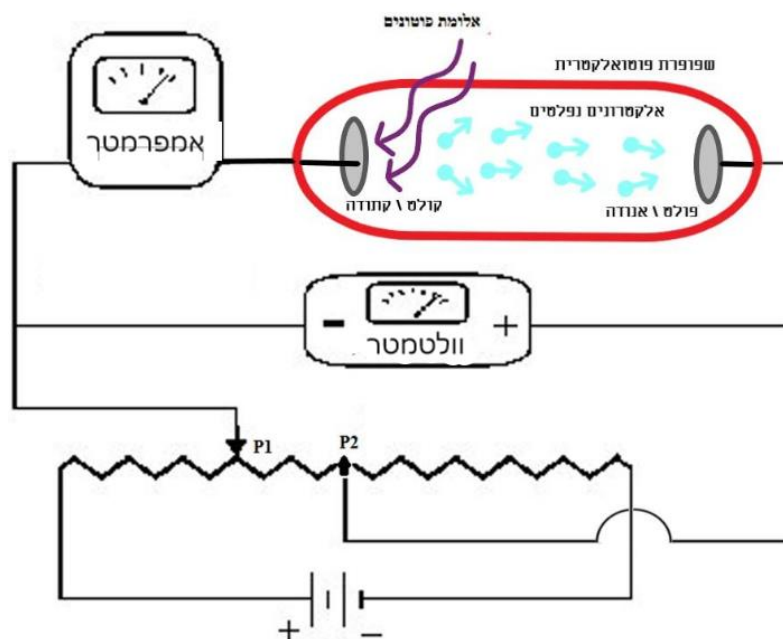
משוואת איינשטיין מקשרת בין אנרגיית הפוטון שפוגע במתכת – E_{ph} – ובין אנרגיה הקינטית המקסימלית של האלקטרון שנעקר מהמתכת – $E_{k,max}$:

$$E_{ph} = B + E_{k,max}$$

כאשר: $E_{ph} = hf$, h – קבוע פלאנק, f – תדירות האור הפוגע במתכת, B – פונקציית העבודה של המתכת.

מערכת הניסוי של מיליקן

אפשר לחקור את האפקט הפוטואלקטרי באמצעות שפופרת מרוקנת מאוויר ובתוכה שתי אלקטרודות: האחת מכונה "פולט" (או "קתודה"), והשנייה מכונה "קולט" (או "אנודה"). הקתודה עשויה מתכת עם פונקציית עבודה המאפשרת עקירת אלקטרונים כשמכוונים לכיוונה קרינה אלקטרומגנטית (בתחום האור הנראה או העל-סגול).



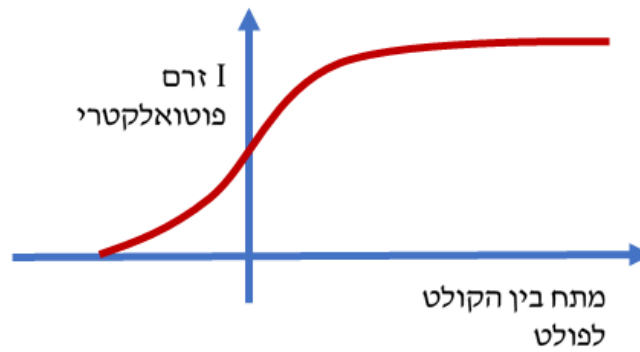
תרשים ב' – מערכת הניסוי

תרשים ב' מתאר את מערכת הניסוי. האלקטרונים, שנפלטים מהקתודה בגלל האפקט, עשויים להיקלט באנודה. את זרם האלקטרונים שנקלט באנודה מודד אמפרמטר. בנוסף לכך, אפשר לשלוט על המתח בין האנודה לקתודה על ידי הזזת נקודות המגע של הפוטנציומטר (המתח יכול להיות חיובי, שלילי או אפס).

כדי לבנות אופיין של השפופרת הפוטואלקטרית משנים את המתח בין האנודה לקתודה.

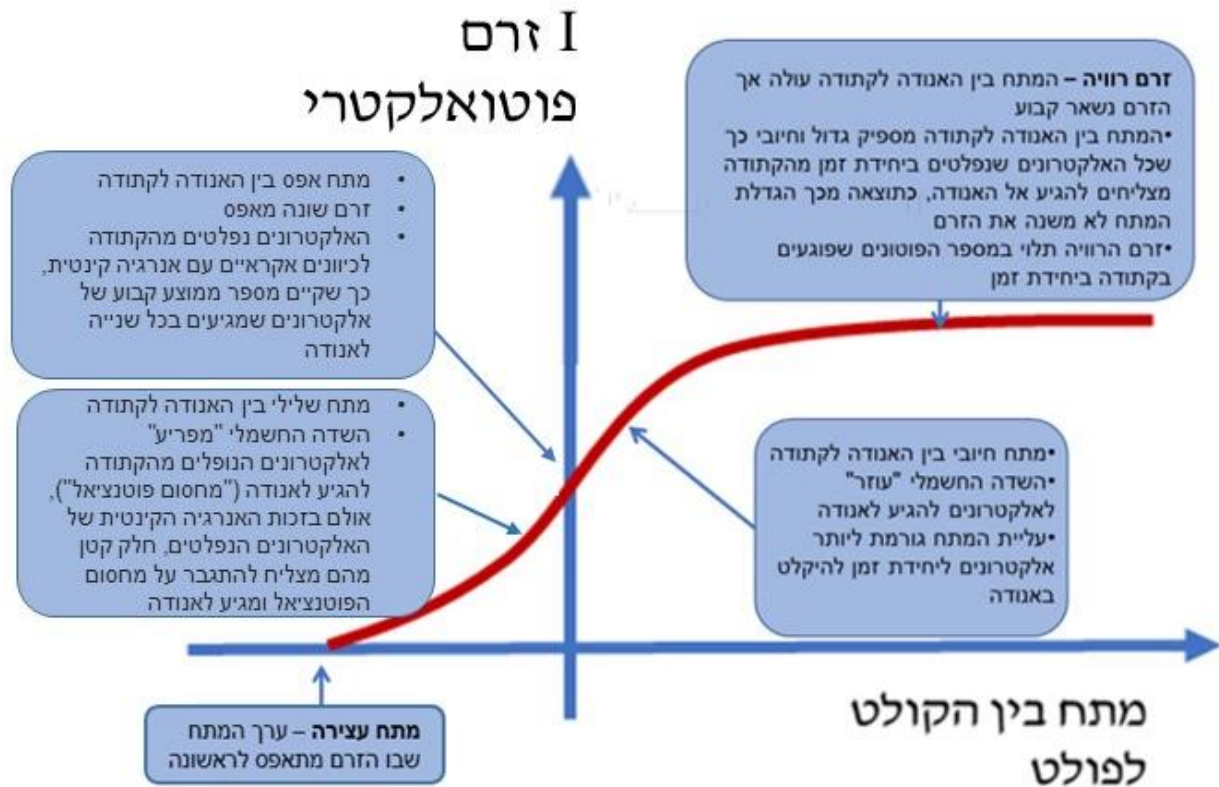
$$V = V_{\text{anode}} - V_{\text{cathode}} \text{ לקתודה:}$$

קובעים בכל פעם מתח אחר בין הקתודה לאנודה ורשמים את ערך הזרם הפוטואלקטרי שמראה האמפרמטר. תרשים ג' מתאר את האופיין של השפופרת הפוטואלקטרית.



תרשים ג' – אופיין השפופרת הפוטואלקטרית

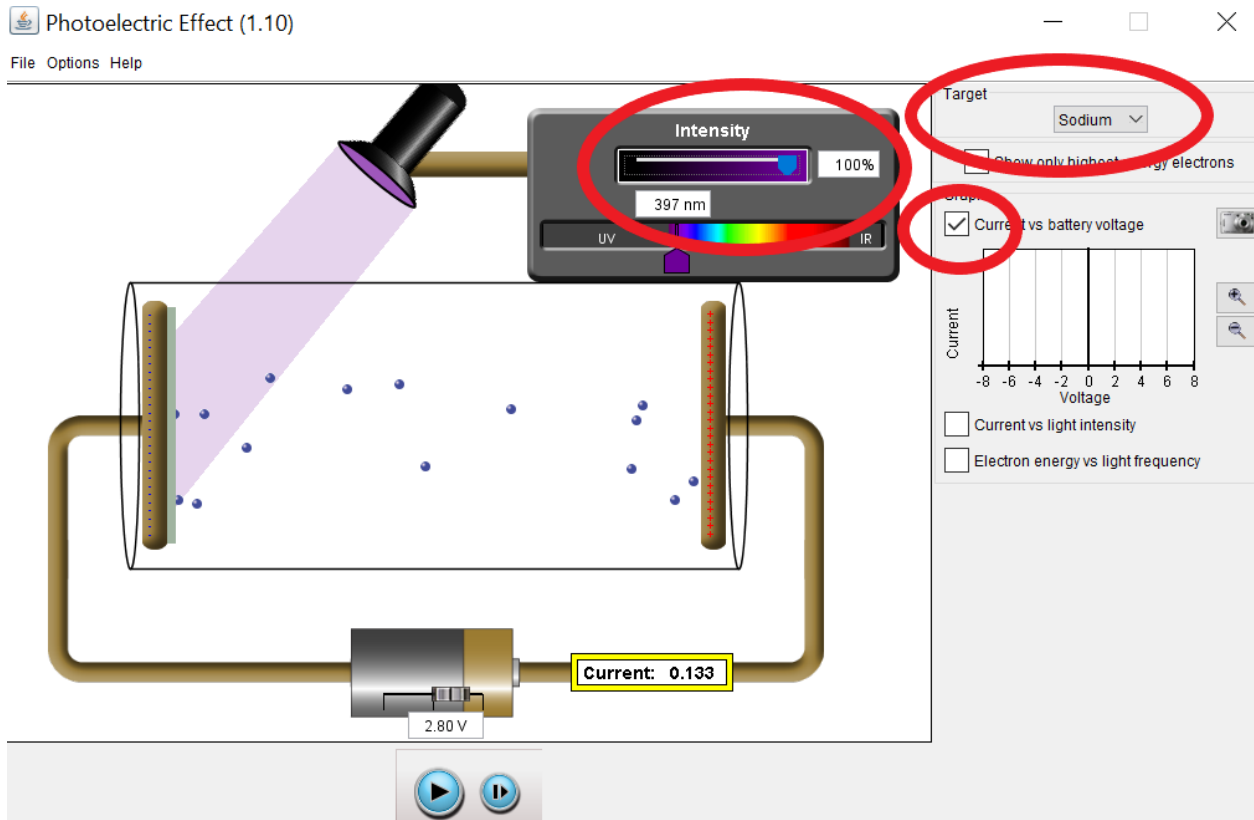
סיכום מבנה האופיין בתרשים ד':



תרשים ד' – מבנה האופיין

שלב א' – חקירת הקשר בין המתח העוצר לתדירות האור הפוגע בקתודה (1) הכנת הסימולציה (תרשים ה'):

- הפעילו את הסימולציה לחקירת האפקט הפוטואלקטרי
- כוונו את עוצמת ההארה (Intensity) על הערך המקסימלי (100%).
- בעבור מתכת המטרה (Target) בחרו באופציה sodium (נתרן).
- סמנו, בעזרת העכבר, את המשבצת current vs battery voltage (יופיע הגרף המתאים).



תרשים ה' – הכנת הסימולציה

(2) שרטוט גרף מתח העצירה כתלות בתדירות הפוגעים בקתודה:

- בעזרת העכבר (או על ידי הקלדה בחלון המתאים), בחרו באורך גל של 150nm ושנו בצורה רציפה את המתח בין האנודה לקתודה. בחלון הגרף current vs battery voltage יופיע האופיין של השפופרת (מומלץ להיעזר בכפתור זכוכית המגדלת בצידו הימני של הגרף כדי להגדיל או להקטין את התמונה).
- קבעו את מתח העצירה בעזרת נקודת החיתוך של הגרף עם ציר המתח. בעזרת העכבר (או על ידי הקלדה בחלון המתאים), הציבו את הסימולציה על ערכו של מתח העצירה שמצאתם.

מה קורה לאלקטרונים שנפלטים מהקתודה במצב זה?

תשובה: אפשר לראות שהאלקטרונים "נעצרים" ליד האנודה והזרם הפוטואלקטרי מתאפס.

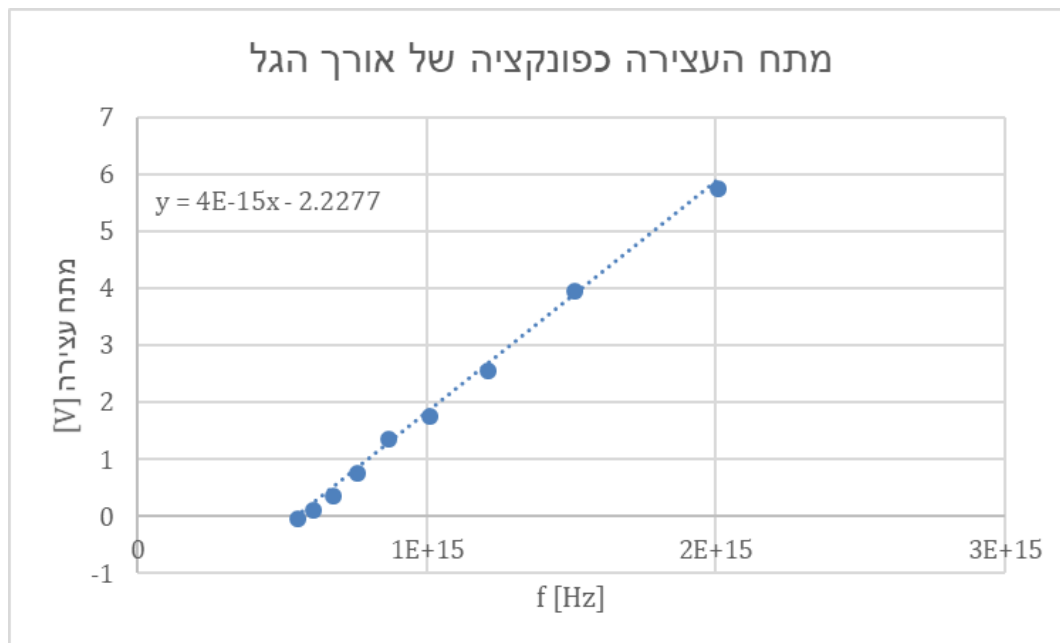
מהו הקשר בין האנרגיה הקינטית המקסימלית של האלקטרונים הנפלטים מהקתודה ובין מתח העצירה?

תשובה: $E_{kmax} = Vq$

· חזרו על התהליך בעבור אורכי הגל הרשומים בטבלה הבאה. לכל אורך גל רשמו את מתח העצירה המתאים.

אורך גל [nm]	מתח העצירה (ערך מוחלט) [V]	תדירות [Hz]
150	5.8	2E+15
200	4	1.5E+15
250	2.6	1.2E+15
300	1.8	1E+15
350	1.4	8.57E+14
400	0.8	7.5E+14
450	0.4	6.67E+14
500	0.15	6E+14
550	0	5.45E+14

- בעזרת הקשר $\lambda = \frac{c}{f}$ (c – מהירות האור, f – תדירות הפוטונים, λ – אורך הגל), מלאו את העמודה השמאלית של הטבלה.
 - שרטטו גרף של מתח העצירה כתלות בתדירות הפוטונים הפוגעים בקתודה (אפשר להיעזר בתוכנת אקסל או לשרטט את הגרף לפי קנה מידה מתאים).
- הגרף:**



- הוסיפו לגרף קו מגמה מתאים.
- בעזרת נוסחת איינשטיין, פתחו את הקשר בין מתח העצירה לתדירות. הראו שמדובר בקו ליניארי.

$$V = \frac{B}{q} - \frac{h}{q}f$$

- בעזרת קו המגמה של הגרף, מצאו את ערכו של קבוע פלאנק ($10^{-34} \text{J}\cdot\text{s}\cdot 6.4$) ואת פונקציית העבודה של הנתרן (2.23eV).
- דאו שהערכים שחישבתם אכן תואמים את ערכי הספרות.

שלב ב' – חקירת ההשפעה של עוצמת האור על האלקטרונים שנעקרים מהמתכת

- בעבור אורך גל של 150nm ונתרן כמתכת המטרה, השלימו את הטבלה הבאה:

עוצמת האור (באחוזים)	זרם הרוויה [A]	מתח העצירה [V]
100%	1.324	-6
75%	0.998	-6
50%	0.662	-6
25%	0.326	-6

- האם שינויים בעוצמת האור משנים את זרם הרוויה? מדוע?
כן, אפשר לראות ערכים שונים בטבלה בעבור עוצמות הארה שונות. עוצמת הארה חלשה יותר פירושה פחות פוטונים שפוגעים בקתודה וגורמים לעקירת אלקטרונים. כלומר, פחות אלקטרונים יגיעו לאנודה בכל שנייה, חרם הרוויה קטן.
- האם שינויים בעוצמת האור משנים את מתח העצירה? מדוע?
לא, אפשר לראות שהעמדה המתאימה בטבלה אינה משתנה. לפי נוסחת איינשטיין, מתח העצירה תלוי באנרגיית הפוטון הפוגע ובפונקציית העבודה, ואינו תלוי במספר הפוטונים שפוגעים בקתודה.
- שרטטו על אותה מערכת צירים אופיינים של השפופרת הפוטואלקטרית (הזרם הפוטואלקטרי כתלות במתח בין האנודה לקתודה), בעבור עוצמת אור חזקה ועוצמת אור חלשה יותר.
נקודת החיתוך עם הציר האופקי זהה – אותו מתח עצירה, זרמי רוויה שונים בהתאם לעוצמת האור.

שלב ג' – חקירת ההשפעה של פונקציית העבודה על האלקטרונים שנעקרים מהמתכת

- עבור אורך גל של 150nm ועוצמת הארה מקסימלית, השלימו את הטבלה הבאה:

סוג המתכת	זרם הרוויה [A]	מתח העצירה [V]
נתרן (Sodium)	1.324	-6
אבץ (Zinc)	1.301	-4
נחושת (Copper)	1.052	-3.8
פלטיניום (Platinum)	0.32	-2
סידן (Calcium)	1.324	-5.4

- האם שינויים בעוצמת האור משנים את זרם הרוויה? מדוע?
אפשר לראות הבדלים בחלק מהמתכות. לכאורה, על פי משוואת איינשטיין לא אמור להיות הבדל בזרם הרוויה. בפועל, למתכות שונות ישנם סיכויים שונים לעקירת אלקטרונים עקב פגיעה של פוטונים. כנראה שזהו המקור להבדלים בזרם הרוויה.
- האם שינויים בעוצמת האור משנים את מתח העצירה? מדוע?

כן, אפשר לראות שהעמודה המתאימה בטבלה משתנה. הדבר נובע מנוסחת איינשטיין – בעבור פונקציית עבודה גדולה יותר, האנרגיה הקינטית של האלקטרונים המשתחררים נמוכה יותר, ולכן גם מתח העצירה בערכו המוחלט.

· למי פונקציית עבודה גבוהה יותר, לנתרן או לפלטיניום? הסבירו.
פלטיניום. מתוך הטבלה אפשר לראות שלפלטיניום מתח עצירה נמוך יותר בערכו המוחלט: כלומר, אנרגיה קינטית נמוכה יותר של אלקטרונים נפלטים. לפי משוואת איינשטיין, הפלטיניום מתאים לפונקציית עבודה גבוהה יותר.

סיכום

ענו על השאלה שבקישור הבא:

http://meyda.education.gov.il/sheeloney_bagrut/2013/6/HEB/36541.pdf

(שאלה 3, שאלון בגרות פיזיקה – קרינה וחומר, קיץ תשע"ג)