

פרק ח: המודל הדואלי של האור

1. האפקט הפוטואלקטרי הוא תופעה של עקירת אלקטרונים ממתכת כתוצאה מקרינה אלקטרומגנטית הפוגעת במתכת.

2. על-פי התאוריה של איינשטיין - האינטראקציה בין קרינה לחומר מתרחשת במנות אנרגיה בדידות ("קוונטים") של הקרינה המכוננות פוטונים. כאשר מקרינים מתכת בקרינה אלקטרומגנטית - האינטראקציה מתרחשת בין פוטון יחיד לבין אלקטרון יחיד של המתכת. פוטון יעקור אלקטרון אם האנרגיה של הפוטון גדולה מאנרגיית הקשר של האלקטרון, או שווה לה. האנרגיה של פוטון נמצאת ביחס ישר לתדירות הקרינה - $E = hf$, לכן ככל שתדירות הקרינה גדולה יותר - האנרגיה של כל פוטון גדולה יותר. התדירות של האור האדום נמוכה לעומת תדירות של קרינה על-סגולה, לכן האנרגיה של פוטון יחיד של אור אדום נמוכה מזו של פוטון יחיד של קרינה על-סגולה. כאשר מקרינים לוח אבץ באור אדום, ופוטון פוגע באלקטרון שבלוח אבץ - אין לו די אנרגיה לעקור את האלקטרון, לכן אלקטרונים אינם נעקרים מלוח האבץ, והאלקטרוסקופ אינו נפרק.

לעומת זאת תדירותה של קרינה על-סגולה היא גבוהה (ביחס לתדירות של אור אדום), ולכל פוטון של הקרינה העל-סגולה יש אנרגיה רבה. כאשר פוטון פוגע באלקטרון של לוח האבץ - יש לו די אנרגיה לעקור את האלקטרון. לכן הקרינה העל-סגולה הפוגעת בלוח האבץ עוקרת ממנו אלקטרונים והאלקטרוסקופ נפרק.

3. התשובה הנכונה היא סיבה (3).

4. התשובה הנכונה היא אפשרות (3).

הסבר: אם מגדילים את עוצמת האור בלי לשנות את תדירותו - מגדילים את מספר הפוטונים, אך לא את האנרגיה של פוטון יחיד. לכן מספר האלקטרונים הנעקרים מן המתכת גדל (כי ביחידת זמן פוגעים במתכת יותר פוטונים). האנרגיה הקינטית של כל אלקטרון שנעקר אינה משתנה, כי אם לא משנים את המתכת אנרגיה זו תלויה רק באנרגיה של פוטון יחיד.

5. נציב את הנתונים בנוסחת איינשטיין:

$$E = E_k + B$$

$$4.9 = E_k + 3.4 \Rightarrow E_k = 1.5 \text{ eV}$$

6. התשובה הנכונה היא (2).

הסבר: מן העובדה שפוטונים בעלי אנרגיה של 5 eV עוקרים ממתכת מסוימת אלקטרונים שהאנרגיה הקינטית שלהם היא 1.5 eV נובע כי אנרגיית הקשר של האלקטרונים למתכת זו היא בת 3.5 eV . $B = 5 \text{ eV} - 1.5 \text{ eV} = 3.5 \text{ eV}$. האנרגיה המינימלית של פוטונים שיעקרו אלקטרונים היא האנרגיה הדרושה כדי לעקור את האלקטרונים אך בלי להעניק להם אנרגיה קינטית לאחר עקירתם. בדוגמה הנוכחית אנרגיה זו היא בת 3.5 eV .

7. א. נחשב את האנרגיה של הפוטון ביחידה ג'ול:

$$E = hf = 6.63 \cdot 10^{-34} \cdot 6 \cdot 10^{14} \approx 3.98 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ eV} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

$$E = \frac{3.98 \cdot 10^{-19} \text{ J}}{1.6 \cdot 10^{-19} \text{ J/eV}} = 2.49 \text{ eV}$$

הקשר בין היחידות אלקטרון-וולט וג'ול:

מכאן שאנרגיית פוטון השייך לקרינה היא:

ב. נפתח תחילה נוסחה לחישוב אנרגיה של פוטון על-פי אורך הגל של הקרינה. נעיר כי זו נוסחה מקוצרת המקלה על החישובים, אם כי אפשר לחשב אנרגיה של פוטון גם ללא שימוש בנוסחה זו. מומלץ לפתח את הנוסחה לתלמידים במסגרת פתרון של התרגיל.

$$(1) \quad c = \lambda f$$

$$(2) \quad E = hf$$

נציב את הביטוי ל- f המתקבל מקשר (1) לעיל בקשר (2) לעיל ונקבל:

$$(3) \quad E = \frac{hc}{\lambda}$$

כדי שתוצאת חישוב באמצעות ביטוי (3) תתקבל ביחידה אלקטרון-וולט, נחלק את ביטוי (3) ב- $1.6 \cdot 10^{-19}$:

$$(4) \quad E(\text{eV}) = \frac{hc}{\lambda \cdot 1.6 \cdot 10^{-19}}$$

עתה נציב בגודל מהירות האור בריק, c , ובקבוע של פלנק, h , את ערכיהם. את הערך של λ יש להציב בנוסחה (4) במטרים. כדי שנוכל להציב את λ ביחידה nm - נכפול את λ בנוסחה (4) ב- 10^{-9} :

$$(5) \quad E(\text{eV}) = \frac{6.63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{\lambda(\text{nm}) \cdot 10^{-9} \cdot 1.6 \cdot 10^{-19}}$$

$$(6) \quad E(\text{eV}) = \frac{1240}{\lambda(\text{nm})}$$

לאחר חישוב נקבל כי בקירוב טוב מתקיים קשר:

נוסחה (6) נוחה לחישוב אנרגיה של פוטון ביחידה eV, כאשר אורך הגל של הקרינה ניתן ביחידה nm. האנרגיה של פוטון בקרינה שאורך הגל שלה 700 nm:

$$E(\text{eV}) = \frac{1240}{\lambda(\text{nm})} = \frac{1240}{700} = 1.77 \text{ eV}$$

האנרגיה של פוטון בקרינה שאורך הגל שלה 400 nm:

$$E(\text{eV}) = \frac{1240}{\lambda(\text{nm})} = \frac{1240}{400} = 3.1 \text{ eV}$$

$$1.77 \text{ eV} < E < 3.1 \text{ eV} \quad \text{פוטון אור נראה} \quad \text{לכן:}$$

8. א. נחשב בעזרת קשר (6) שפיתחנו בתשובה לשאלה (7):

$$E(\text{eV}) = \frac{1240}{\lambda(\text{nm})} = \frac{1240}{500} = 2.48 \text{ eV}$$

ב. נציב את הנתונים בנוסחת איינשטיין:

$$E = E_k + B$$

$$2.48 \text{ eV} = 0.3 \text{ eV} + B \Rightarrow B = 2.18 \text{ eV}$$

ג. על-פי התוצאה בשאלה 7, האנרגיה של פוטון בקרינה שאורך הגל שלה 700 nm היא 1.77 eV. פוטון בעל אנרגיה זו לא יעקור אלקטרון מן המתכת המסוימת, כי האנרגיה של פוטון כזה נמוכה מאנרגיית הקשר של האלקטרון למתכת (2.18 eV).

9. א. נחשב תחילה את האנרגיה של פוטון מהקרינה האלקטרומגנטית הפוגעת במגזיון:

$$E = hf = 6.63 \cdot 10^{-34} \cdot 10^{15} \approx 6.63 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

$$E = \frac{6.63 \cdot 10^{-19} \text{ J}}{1.6 \cdot 10^{-19} \text{ J/eV}} \approx 4.14 \text{ eV} \quad \text{עתה נבטא את האנרגיה באלקטרון-וולט:}$$

כדי לחשב את האנרגיה הקינטית של האלקטרון נציב את הנתונים בנוסחת איינשטיין:

$$E_{\text{פוטון}} = E_k + B$$

$$4.14 = E_k + 3.69 \text{ eV} \Rightarrow E_k = 0.45 \text{ eV}$$

ב. כדי לחשב את תדירות הסף נציב בנוסחת איינשטיין 0 עבור האנרגיה הקינטית של האלקטרון:

$$E = 0 + B \Rightarrow h \cdot f_0 = B \Rightarrow 6.63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot s \cdot f_0 = 3.69 \text{ eV} \cdot 1.6 \cdot 10^{-19} \frac{\text{J}}{\text{eV}} \Rightarrow f_0 = 8.9 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$$

ג. קרינה אלקרומגנטית שתדירותה נמוכה מזו שחישבנו בסעיף ב אינה יכולה אמנם לעקור אלקטרונים ממגנזיום, אולם היא תוכל לעקור אלקטרונים ממתכת אחרת שאנרגיית הקשר שלה קטנה מאנרגיית פוטון של הקרינה הפוגעת או שווה לה.

10. אורך הגל המרבי של הקרינה שהפוטונים שלה מסוגלים לשחרר אלקטרונים ממתכת הצזיום הוא אורך גל של קרינה שהאנרגיה של כל אחד מהפוטונים שלה שווה לאנרגיית הקשר של הצזיום - 1.9 eV. זהו אורך הגל המתאים לתדירות הסף. אם אורך הגל יהיה גדול יותר - התדירות תהיה קטנה מתדירות הסף, והקרינה לא תוכל לעקור אלקטרונים מהצזיום.

נחשב, אם כן, את אורך גל של קרינה שאנרגיית פוטון שלה הוא 1.9 eV. נעשה זאת בעזרת נוסחה (6) שפיתחנו בפתרון שאלה 7.

$$E(\text{eV}) = \frac{1240}{\lambda(\text{nm})} \Rightarrow \lambda(\text{nm}) = \frac{1240}{E(\text{eV})} = \frac{1240}{1.9} \approx 653 \text{ nm}$$

11. האנרגיה של פוטון יחיד היא $E = hf$, לכן האנרגיה של n פוטונים היא $hf \cdot n$.

12. פירוש המשפט "האנרגיה של אור היא מקוונטת" הוא שהאנרגיה של אור אינה יכולה לקבל כל ערך, אלא רק ערכים שהם מכפלה של גודל יסודי (האנרגיה של פוטון יחיד) במספר שלם.

13. פירוש המשפט "אלומה חזקה של אור אדום" הוא שהאלומה "מורכבת" ממספר רב של פוטונים. אולם האינטראקציה מתרחשת בין פוטון יחיד לבין אלקטרון יחיד של המתכת. לפוטון הפוגע באלקטרון "לא עוזר" שיש באלומה פוטונים רבים אחרים, כי הם "לא עוזרים לו בניסיון לעקור אותו מן המתכת". לעומת זאת כאשר מדובר באלומה חלשה של אור סגול, לכל פוטון של האור הסגול יש יותר אנרגיה מאשר לפוטון של אור אדום.

$$E(\text{eV}) = \frac{1240}{\lambda(\text{nm})} = \frac{1240}{0.01} = 124,000 \text{ eV} = 124 \text{ keV} \quad \text{14. א. (1)}$$

$$E(\text{eV}) = \frac{1240}{\lambda(\text{nm})} = \frac{1240}{400} = 3.1 \text{ eV} \quad \text{(2)}$$

ב. (1) קרינת רנטגן בעלת אורך גל 0.01 nm יכולה ליינן אטומי מימן, כי כדי ליינן אטום מימן דרושה אנרגיה של לפחות 13.6 eV, ואנרגיית פוטון מקרינה זו שווה ל-124,000 eV, וזו ודאי גדולה מ-13.6 eV.

(2) אור סגול בעל אורך גל 400 nm אינו יכול ליינן אטומי מימן, כי אנרגיית פוטון מאור זה שווה ל-3.1 eV, וערך זה קטן מ-13.6 eV.

15. בתדירויות שבהן האפקט הפוטואלקטרי מתרחש - ככל שמקטינים את התדירות - האנרגיה הקינטית של האלקטרונים הנעקרים הולכת וקטנה. התדירות שבה העקום חותך את ציר התדירות זו התדירות שבה האנרגיה

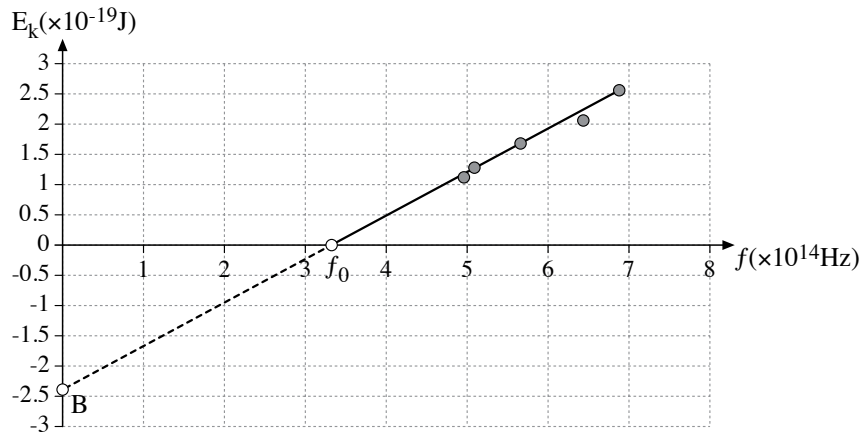
הקינטית של האלקטרונים הנעקרים מתאפסת לראשונה, וזו בדיוק ההגדרה של תדירות סף. בהקרנת אור בעל תדירות כלשהי שמימין לתדירות זו (בציר התדירות של הגרף) לאלקטרון יש אנרגיה קינטית, ובתדירות שממאל לתדירות זו - ערך האנרגיה הקינטית אמור להיות שלילי, והמשמעות היא שהאלקטרון אינו נעקר.

16. פונקציית העבודה של הנתרן (הערכה על-פי הגרף): 1.7 eV .
פונקציית העבודה של הליתיום (הערכה על-פי הגרף): 2.3 eV .

17. א. נחשב בעזרת הנוסחה $c = \lambda f$ את התדירויות, f , של כל הקרינות שפגעו במתכת. כמו כן נחשב את האנרגיות הקינטיות של האלקטרון ביחידה ג'ול על ידי הכפלת האנרגיה המבוטאת ב- eV ב- $\frac{1.6 \cdot 10^{-19} \text{ J}}{\text{eV}}$.

λ - אורך הגל של הקרינה הפוגעת (nm)	f - התדירות של הקרינה הפוגעת (10^{14} Hz)	E_k - האנרגיה הקינטית של האלקטרונים הנפלטים (eV)	E_k - האנרגיה הקינטית של האלקטרונים הנפלטים (10^{-19} J)
436	6.88	1.60	2.56
470	6.38	1.32	2.11
530	5.66	1.05	1.68
589	5.09	0.80	1.28
605	4.96	0.70	1.12

להלן גרף המתאר את האנרגיה הקינטית של האלקטרונים הנעקרים כפונקציה של התדירות.



(1) $E_k = 7.2 \cdot 10^{-34} \cdot f - 2.4 \cdot 10^{-19}$ משוואת הישר היא:

כאשר f נמדד ביחידה הרץ, ו- E_k ביחידה ג'ול.

אפשר לפתח את משוואה (1) על-פי הגרף, או לקבל אותה ישירות בגיליון אלקטרוני.

ב. (1) תדירות הסף היא התדירות שעבורה האנרגיה הקינטית של האלקטרונים הנעקרים שווה לאפס. נציב, אם

כן, בנוסחה (1) שבסעיף א לעיל $E_k = 0$ ונקבל:

$$0 = 7.2 \cdot 10^{-34} \cdot f_0 - 2.4 \cdot 10^{-19} \Rightarrow f_0 \approx 3.3 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$$

הערה: אפשר להעריך את הערך של f_0 גם על-פי חיתוך הגרף עם הציר האופקי, ואז לא נדרשת משוואה (1).
(2) פונקציית העבודה מופיעה בנוסחת איינשטיין כאיבר החופשי. על-פי נוסחה (1) שבסעיף א לעיל פונקציית העבודה של המתכת היא:

$$B = 2.4 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 1.5 \text{ eV}$$

הערה: אפשר להעריך את הערך של B גם על-פי חיתוך הגרף עם הציר האנכי, ואז לא נדרשת משוואה (1).
(3) הקבוע של פלאנק מופיע בנוסחת איינשטיין כמקדם של התדירות. על-פי נוסחה (1) שבסעיף א לעיל קבוע פלאנק המתקבל מתוצאות ניסוי זה הוא:

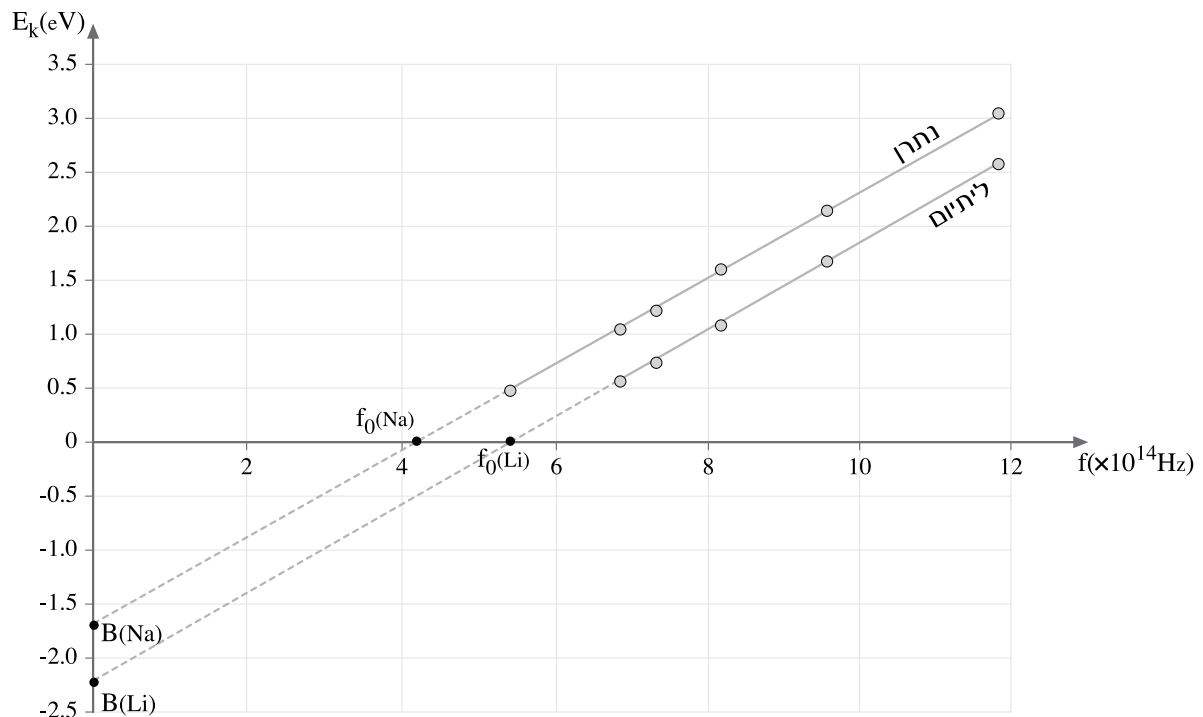
$$h = 7.2 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

הערה: h התקבל מניסוי עם שגיאות מדידה מסוימות, לכן ערך זה שונה מהערך הידוע מהספרות. גם כאן לא נדרשת משוואה (1) אלא אפשר לקבל את הערך של h מחישוב שיפוע הגרף.

18. א. הישרים לא צפויים להיחתך זה עם זה, אלא להיות מקבילים זה לזה. השיפועים של הישרים צריכים להיות שווים לקבוע של פלאנק.

ב. (1) עבור אותן תדירויות כלומר עבור פוטונים בעלי אנרגיות שוות, ערכי האנרגיות הקינטיות של האלקטרונים הנפלטים מהליתיום הם נמוכים מאלה של הנתרן. מכאן, שאנרגיית הקשר של האלקטרונים לליתיום גדולה מזו לנתרן לכן דרוש פוטון אנרגטי יותר כדי לשחרר אלקטרון מליתיום. במילים אחרות התדירות המינימלית גדולה יותר.

(2) עבור אותן תדירויות, כלומר עבור פוטונים בעלי אנרגיות שוות, ערכי האנרגיות הקינטיות של האלקטרונים הנפלטים מהליתיום הם נמוכים מאלה של הנתרן, לכן אנרגיית הקשר של הליתיום גדולה מזו של הנתרן.
ג. לפי הגרף:



ואכן רואים שמתקבלות המסקנות הרשומות בתשובות לסעיפים א ו- ב.

$$E(\text{eV}) = \frac{1240}{0.00124} = 1,000,000 \text{ eV} = 1,000 \text{ keV} \quad \text{19. אנרגיית פוטון לפני התנגשותו באלקטרון:}$$

$$E_1 = \frac{1240}{0.00140} = 885,714.3 \text{ eV} = 885.71 \text{ keV} \quad \text{אנרגיית הפוטון המתפזר:}$$

$$E_2 = 1,000 - 885.71 = 114.29 \text{ keV} \quad \text{לכן אנרגיית האלקטרון המפוזר:}$$

20. המודל החלקיקי של ניוטון מבוסס על חלקיקים חומריים "רגילים", בעלי מסה, המקיימים את חוקי ניוטון. לעומת זאת המודל הדואלי מבוסס על חלקיקים שהם "מנות" של אנרגיה, והם אינם חלקיקים במובן הקלאסי של המילה, כלומר אינם מקיימים את חוקי ניוטון.

המודל החלקיקי של ניוטון מתיימר להסביר את כל תופעות האור, ואילו המודל הדואלי מתיימר להסביר באמצעות תכונות חלקיקיות רק תופעות הקשורות באינטראקציה של האור עם החומר.

21. תכונות גליות של האור מתגלות בתופעות של התפשטות האור.

תכונות חלקיקיות של האור מתגלות בתופעות של אינטראקציה בין אור לחומר.

22. כי קרינת השמש כוללת קרינה על-סגולה, בה פוטונים אנרגטיים יותר מאשר באור לבן של נורת להט.

23. תמונה זו אינה תואמת את המודל הדואלי של האור. ההנחה של המודל לגבי תכונות גליות של פוטון היא שבאותן תופעות שבהן יש לראות את התנהגות האור כהתנהגות של פוטונים (באינטראקציה עם חומר) - האנרגיה של פוטון נקבעת על ידי התדירות של האור, ותדירות היא תכונה גלית.

24. א. (1) המגע הנייד P_2 צריך להיות בנקודה מתאימה מימין לנקודת המגע הקבועה P_1 .

(2) כאשר עוצמת האור קבועה, מספר האלקטרונים הנפלטים מהפולט ביחידת זמן הוא קבוע. לנוחיות ההסבר נניח כי נפלטים מהפולט בכל שנייה 1,000 אלקטרונים. במתחים שליליים ובמתחים חיוביים נמוכים, מספר האלקטרונים המגיעים לקולט בכל שנייה הוא נמוך מ-1,000 (חלק מהאלקטרונים מוחזרים לפולט). החל ממתח חיובי מסוים (בגרף א' שבשאלה זהו המתח המתאים לנקודה C) מצליחים להגיע לקולט 1,000 אלקטרונים בכל שנייה. כאשר מעלים את המתח - מספר האלקטרונים המגיעים לקולט אינו יכול לעלות, כי הרי נפלטים מהפולט בכל שנייה רק 1,000 אלקטרונים.

(3) כאשר המגע הנייד P_2 נמצא משמאל למגע הקבוע P_1 הפוטנציאל של הקולט נמוך מזה של הפולט, לכן המתח $V_{\text{קולט}} - V_{\text{פולט}}$ (קרא משמאל לימין) הוא שלילי ומצב זה מאפשר לערוך מדידות בחלק AB של גרף א' המופיע בשאלה.

(4) יש ירידה בזרם ככל שהמתח הולך וקטן, כיוון שהאלקטרונים הנעים בתוך התא הפוטואלקטרי מהפולט לקולט מהווים "ענן אלקטרונים" שדוחה את האלקטרונים הנפלטים מהפולט ומחזיר חלק מהם לפולט. ככל שהמתח יורד - יותר אלקטרונים ביחידת זמן מוחזרים לפולט, לכן פחות אלקטרונים (ביחידת זמן) מגיעים לקולט כלומר הזרם יורד.

ב. אפשר לראות באיור המצורף לשאלה שהגרפים חותכים את ציר המתח באותה נקודה (המסומנת באיור באות A). מכאן, שבשני הניסויים יש אותו מתח עצירה. כיוון ששני הניסויים נערכו עם אותו תא פוטואלקטרי, כלומר עם אותה מתכת, הרי המסקנה היא שבשני הניסויים תדירות הקרינה היתה שווה. מאידך גיסא, זרמי הרוויה בשני הניסויים שונים, מכאן שהשינוי שנעשה הוא **בעוצמת ההארה**. עוצמת ההארה בניסוי השני יותר גדולה מאשר בניסוי הראשון.

$$E(\text{eV}) = \frac{1,240}{\lambda(\text{nm})} = \frac{1,240}{550} = 2.56 \text{ eV} \quad \text{25. א.}$$

$$E(J) = 2.56 \cdot 1.6 \cdot 10^{-19} = 3.61 \cdot 10^{-19} J$$

$$P_{e.m} = \frac{100 \cdot 60}{100} = 60 W \quad \text{הספק הנורה שנפלט כקרינה אלקטרומגנטית:}$$

$$P = \frac{60 \cdot 2}{100} = 1.2 W \quad \text{הספק הנורה שנפלט על-ידי פוטונים בעלי אורך גל של 550 nm:}$$

כלומר האנרגיה הנישאת במשך שנייה אחת על-ידי פוטונים שאורך הגל שלהם 550 nm הוא 1.2 ג'ול. על פי התשובה לסעיף א האנרגיה של כל פוטון היא $3.6 \cdot 10^{-19}$ ג'ול. לכן מספר הפוטונים, n, בעלי

$$n = \frac{1.2}{3.6 \cdot 10^{-19}} = 3.33 \cdot 10^{18} \quad \text{אורך גל של 550 nm הנפלטים בכל שנייה:}$$

$$N = 60 \cdot n = 60 \cdot 3.33 \cdot 10^{18} = 2 \cdot 10^{20} \quad \text{מספר הפוטונים, N, הנפלטים בדקה:}$$

26. א. הגדלת עוצמת האור משמעותה הגדלה של מספר הפוטונים הנפלטים מהפנס ביחידת זמן. הדבר יתבטא בהגדלת מספר האלקטרונים הנעקרים ביחידת זמן, אולם האנרגיה המרבית של האלקטרונים הנעקרים לא תשתנה (כי היא תלויה באנרגיה של הפוטון יחיד ולא במספר הפוטונים, מאחר שהאינטראקציה היא בין פוטון יחיד לאלקטרון יחיד), לכן מתח העצירה לא ישתנה.

ב. אם מקטינים את אורך הגל של האור, הדבר יתבטא בהגדלת תדירותו (על פי הנוסחה $E = hf$). הגדלת התדירות תתבטא בהגדלת האנרגיה של כל פוטון, מכאן שהאנרגיה הקינטית המקסימלית של האלקטרונים הנעקרים תגדל, ולפיכך מתח העצירה יגדל.

27. האפשרות הנכונה היא (2), כפי שמוסבר בתשובה לשאלה 26 סעיף א'.

$$E_{\text{פוטון}} = E_k + B \quad \text{28. על פי נוסחת איינשטיין:}$$

$$\frac{1,240}{550} = 1.4 + B \Rightarrow B = 0.85 eV \quad \text{מכאן:}$$

פונקציית העבודה היא 0.85 אלקטרון-וולט.

$$E_{\text{פוטון}} = E_k + B \Rightarrow hf = E_k + B \quad \text{29. א. נוסחת איינשטיין:}$$

$$6.63 \cdot 10^{-34} \cdot 10^{15} = E_k + 0.59 \cdot 10^{-18} \Rightarrow E_k = 7.3 \cdot 10^{-20} J \quad \text{נציב ערכים:}$$

$$eV_0 = E_k \Rightarrow 1.6 \cdot 10^{-19} \cdot V_0 = 7.3 \cdot 10^{-20} \Rightarrow V_0 \approx 0.46 V \quad \text{ב.}$$

$$hf_0 = B \Rightarrow 6.63 \cdot 10^{-34} \cdot f_0 = 0.59 \cdot 10^{-18} \Rightarrow f_0 = 8.9 \cdot 10^{14} Hz \quad \text{ג.}$$

30. א. תרשים המעגל החשמלי מופיע באיור 12 (פרק ח) בגוף הספר.

ב. (1) קרינה בעלת אורך גל מקסימלי מתאימה לעקומה B.

הסבר: לקרינה בעלת אורך גל מקסימלי יש תדירות מינימלית; על פי הקשר $E_{\text{פוטון}} = hf$, יש לפוטון של קרינה זו אנרגיה מינימלית, לכן מתח עצירה מינימלי. לעקומה B מתאים מתח עצירה מינימלי.

(2) קרינה בעלת תדירות מקסימלית מתאימה לעקומה C.

הסבר: תדירות מקסימלית משמעותה אנרגיית פוטון מקסימלית, לכן מתח עצירה מקסימלי, וזה מתאים לעקומה C.

ג. כי אלקטרונים נעקרים מהפולט עם אנרגיה קינטית וחלקם מגיעים לקולט, לכן הזרם אינו אפס.

ד. ראה תשובה לשאלה 24 סעיף א(2).

ה. כן, יתכן שכלל לא יהיה זרם פוטואלקטרי במהלך הניסוי. התנאי לכך הוא שאנרגיית פוטון תהיה קטנה מפונקציית העבודה.

31. א. הטבלה:

מספר העקומה	אורך הגל (nm)
1	435.8
2	546.1
3	546.1

הסבר: לקרינה בעלת אורך גל קטן יותר מתאימה תדירות גדולה יותר, לכן מתח עצירה גדול יותר.

$$E_{\text{פוטון}} = eV_0 + B \quad \text{נחשב בעזרת עקומה 1:}$$

$$\frac{1,240}{435.8} = 0.94 + B \Rightarrow B = 1.91 \text{ eV} \quad \text{נחשב ביחידה אלקטרון-וולט:}$$

ג. בניסוי שבו התקבלה עקומה 3 המרחק בין המקור לתא היה גדול יותר, כי לעקומה 3 זרם רוויה קטן יותר מאשר לעקומה 2. המשמעות היא שבניסוי שבו התקבלה עקומה 3 נפלטו מהפולט פחות אלקטרונים לשנייה, כלומר פגעו בפולט פחות פוטונים בשנייה.

ד. (1) נקודות החיתוך של העקומות עם הציר האופקי תזוזנה שמאלה, כי מאחר שפונקציית עבודה קטנה יותר, האלקטרונים יעקרו עם אנרגיה קינטית גדולה יותר. לכן יידרש מתח עצירה שבערכו המוחלט גדול יותר.

(2) אורך הקטע AB לא ישתנה.

$$(1) \quad E_{\text{פוטון}} = eV_0^{(1)} + B^{(1)} \quad \text{נוסחת איינשטיין (לשתי התדירויות) עבור התא הראשון:}$$

$$(1) \quad E_{\text{פוטון}} = eV_0^{(2)} + B^{(2)} \quad \text{נוסחת איינשטיין (לשתי התדירויות) עבור התא השני:}$$

$$B^{(2)} < B^{(1)} \quad \text{כאשר:}$$

$$(3) \quad V_0^{(2)} - V_0^{(1)} = \frac{B^{(2)} - B^{(1)}}{e} \quad \text{מנוסחאות (1) ו-(2) נקבל:}$$

$V_0^{(2)} - V_0^{(1)}$ מייצג את התזוזה של נקודת החיתוך עם הציר האופקי. על פי נוסחה (3) אפשר לראות שתזוזת זו בלתי תלויה בתדירות f. לכן אורך הקטע BA לא ישתנה.

32. א. אורך הגל של קרינה אלקטרומגנטית שתעקור אלקטרונים מכדור הזהב קטן או שווה לאורך גל λ_0 , המתאים לתדירות הסף f_0 . נחשב את λ_0 :

$$E \text{ (eV)} = \frac{1240}{\lambda \text{ (nm)}} \Rightarrow \lambda \text{ (nm)} = \frac{1240}{E \text{ (eV)}} \Rightarrow \lambda_0 \text{ (nm)} = \frac{1240}{4.82} \approx 257 \text{ nm}$$

לכן אורך הגל הנדרש מקיים $\lambda \leq 257 \text{ nm}$.

ב. הפוטנציאל המרבי, V_{max} , שהכדור יכול להגיע אליו הוא זה שהפוטנציאל באינסוף מינוס V_{max} שווה למתח העצירה, V_0 , כי הפוטנציאל באינסוף מתאפס.

$$E_{\text{פוטון}} = eV_0 + B$$

$$E_{\text{פוטון}} = V_0 + B$$

$$\frac{1240}{200} = V_0 + 4.82 \Rightarrow V_0 = 1.38 \text{ V}$$

$$V_{\text{max}} = 1.38 \text{ V} \quad \text{כלומר}$$

ג. נחשב את מטען כדור הזהב, במצב שבו הפוטנציאל שלו 1.38 וולט:

$$V = k \frac{q}{r} \Rightarrow 1.38 = 9 \cdot 10^9 \frac{q}{10^{-2}} \Rightarrow q = 1.53 \cdot 10^{-12} \text{ C}$$

נחשב את מספר האלקטרונים שצריכים להיעקר מהכדור כדי שמטען הכדור יהיה $1.53 \cdot 10^{-12}$ קולון:

$$n = \frac{q}{e} = \frac{1.53 \cdot 10^{-12}}{1.6 \cdot 10^{-19}} = 9.6 \cdot 10^6$$

כלומר המספר המרבי של אלקטרונים שיכולים להיעקר הוא 9.6 מיליון.

33. א. נסמן את אורך הגל המרבי ב- λ_0 . כאשר מטילים על המתכת קרינה שאורך הגל שלה λ_0 , האלקטרונים נעקרים עם אנרגיה קינטית אפס, כלומר כל האנרגיה של פוטון מומרת לפונקציית העבודה של המתכת. נחשב את פונקציית העבודה באלקטרון-וולט:

$$B = \frac{3 \cdot 10^{-19}}{1.6 \cdot 10^{-19}} = 1.875 \text{ eV}$$

$$E(\text{eV}) = \frac{1240}{\lambda(\text{nm})} \Rightarrow \lambda_0(\text{nm}) = \frac{1240}{1.875} \Rightarrow \lambda_0 = 661.3 \text{ nm}$$

$$E_{\text{פוטון}} = E_k + B \quad \text{ב. (1)}$$

$$\frac{1240}{4.4 \cdot 10^{-7} \cdot 10^9} = E_k + 1.875 \Rightarrow E_k = 0.94 \text{ eV}$$

האנרגיה הקינטית המרבית של אלקטרונים הנעקרים מן המתכת היא 0.94 אלקטרון-וולט.

$$E_k = V_0 \quad \text{(2) באלקטרון-וולט:}$$

$$V_0 = 0.94 \text{ V}$$

דרוש מתח של 0.94 וולט כדי למנוע מכל האלקטרונים שנעקרו מלהגיע לקולט.

ג. אם עוצמת הקרינה שתוקרן על המתכת תוכפל, ללא שינוי באורך הגל, אז מספר הפוטונים אמנם יגדל, אך האנרגיה של כל פוטון לא תשתנה, וכיוון שהאינטראקציה היא בין פוטון יחיד לאלקטרון יחיד, התשובות לא תשתנינה.

34. א. כאשר המתח הוא +1V, אפשר לראות בגרף שיש זרם, לכן האלקטרונים האנרגטיים ביותר מגיעים לקולט (אפשרות (1)).

ב+ג. התשובה זהה לתשובה סעיף א.

ד. במקרה זה הזרם מתאפס לראשונה (כלומר במתח קצת יותר גבוה עדיין יש זרם). מכאן שבמקרה זה האלקטרונים האנרגטיים ביותר מגיעים עד נקודה A, אך אינם מגיעים לקולט (אפשרות (2)).

ה. במקרה זה הזרם שווה לאפס, וגם במתח מעט יותר גבוה הזרם שווה לאפס. מכאן שהאלקטרונים האנרגטיים ביותר מגיעים עד נקודה הנמצאת בין הפולט והקולט, כדוגמת נקודה B, ואינם עוברים אותה (אפשרות (3)).