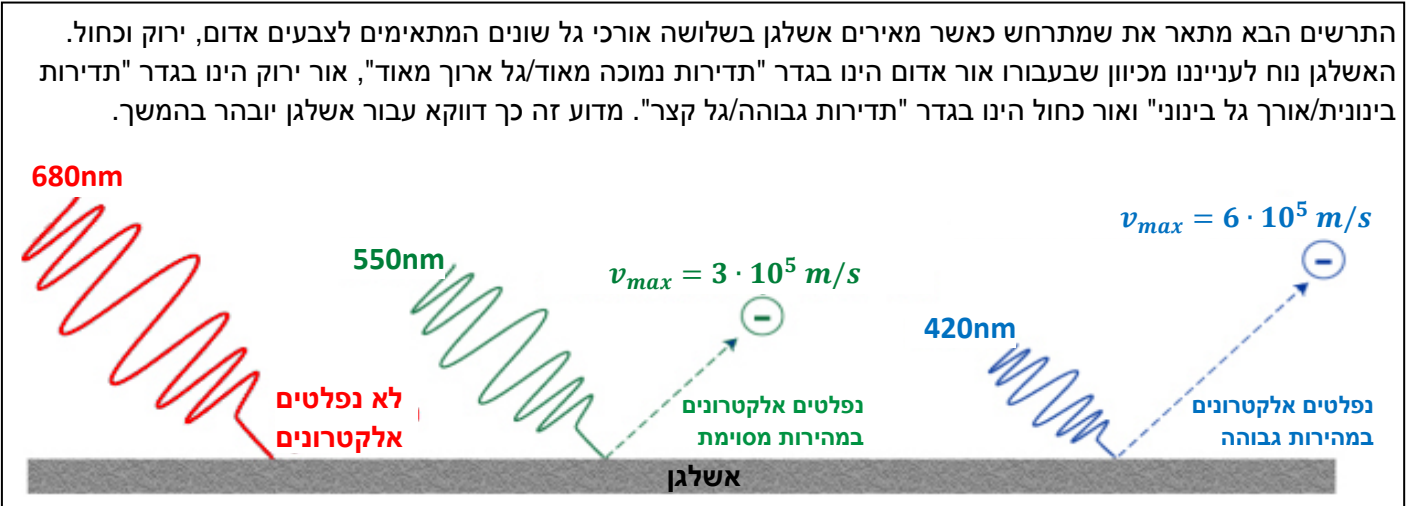


בשיעור הקודם ציינו שהאור הינו גל. קל להשתכנע בכך כשעורכים את הניסויים הרלוונטיים - האור מציג התנהגויות גליות מובהקות כגון התאבכות ועקיפה. חמושים בידע זה, הקרינו הפיזיקאים של המאה ה-19 אור חזק על מספר מתכות שונות, בציפייה שהדבר יגרום לפליטה של אלקטרונים מהן, ואכן כך קרה **במספר מקרים**. אין לתמוה על כך - האנרגיה שנושא עימו גל האור מושקעת בשחרורם של אלקטרונים מהמתכת (יינון המתכת) ובפליטתם החוצה ממנה (חימושם באנרגיה קינטית). כאשר הגבירו/החלישו את **עוצמת** האור (משרעת הגל) נפלטו יותר/פחות אלקטרונים מהמתכת, אך באופן מתמיה קצת, **מהירות** פליטתם לא השתנתה. כאשר הגבירו/הנמיכו את **תדירות** האור, האלקטרונים נפלטו מהמתכת במהירות גבוהה/נמוכה יותר, בעוד מספרם אינו משתנה. סיכום ביניים:

אור חזק/חלש (משרעת גדולה) – הרבה/מעט אלקטרונים נפליטים מהמתכת, אך אין השפעה על מהירותם (ראו הערה למטה).
אור בעל תדירות גבוהה/נמוכה (גל קצר/ארוך) – האלקטרונים נפליטים מהמתכת במהירות גבוהה/נמוכה, אך מספרם קבוע. כעת הנמיכו **מאוד** את תדירות האור, ולא נפלטו מהמתכת אלקטרונים כלל, גם כשעוצמת האור הייתה גבוהה מאוד.

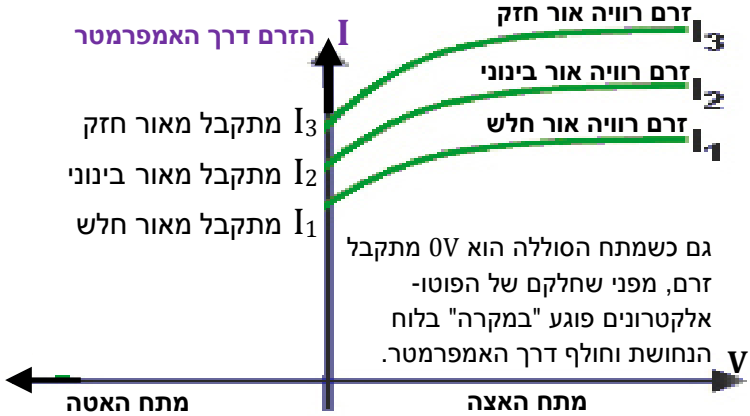
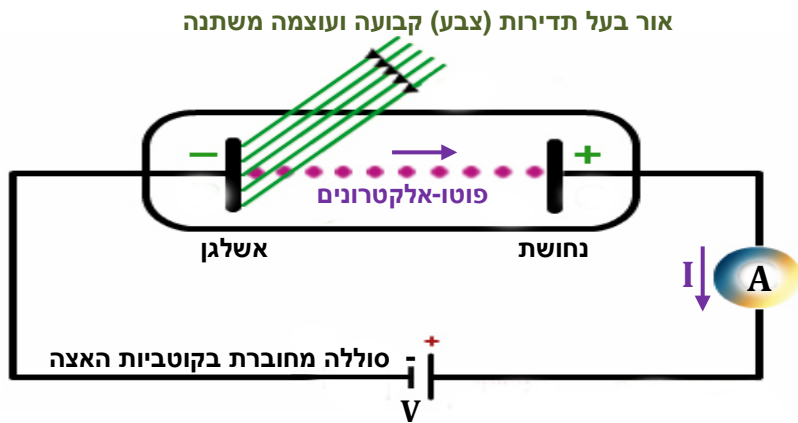


על כך יש כבר לתמוה! הרי אנרגיית הגל תלויה הן בתדירותו והן במשרעתו. מדוע גל קצר בעל משרעת נמוכה אינו שקול לגל ארוך בעל משרעת גבוהה? ובמיוחד במקרה הקיצוני כדוגמת זה שבו מואר האשלגן באור אדום - מדוע לא נפליטים אלקטרונים כלל אפילו כאשר האור האדום חזק מאוד, ז"א משרעת הגל שלו גבוהה מאוד?

את ההסבר לכך נתן איינשטיין ב-1905, ואף זכה על כך בפרס נובל: **האור עשוי מחלקיקים**. אז הוא לא גל כפי שסברו קודם לכן? הוא כן, הוא גם זה וגם זה, "איך שבא לך", **הוא דואלי**, ואין זו מליצה גם אם זה נשמע כך. להלן ההסבר של איינשטיין: האור עשוי חלקיקים שאותם כינה "פוטונים". **לאור בעל תדירות גבוהה יותר (גל קצר יותר) יש פוטונים אנרגטיים יותר. באור בעל משרעת גבוהה יותר יש יותר פוטונים**. אם תדירות האור נמוכה מדי (אדום), אין לפוטון הפוגע באשלגן די אנרגיה בשביל לשחרר ממנו אלקטרון, ואין זה משנה כמה פוטונים כאלה פוגעים באשלגן. אם תדירות האור גבוהה מספיק (כתום), יש לפוטון הפוגע באשלגן בדיוק האנרגיה המספיקה בשביל לשחרר ממנו אלקטרון (לייבן אותו). אנרגיה זו נקראת "**פונקציית העבודה של האשלגן**" או "**אנרגיית היינון של האשלגן**, ותדירות האור המתאימה נקראת "**תדירות הסף**" (f_{TH}) **של האשלגן**. הרבה פוטונים כאלה פוגעים באשלגן – הרבה אלקטרונים משתחררים ממנו. אם תדירות האור גבוהה עוד יותר (ירוק, כחול, סגול וכן הלאה), לפוטון הפוגע באשלגן ישנה אנרגיה מספיקה בשביל לשחרר ממנו אלקטרון ואף להעניק לו "בעיטה", ז"א מנה של אנרגיה קינטית. ככל שגבוהה תדירות האור הפוגע באשלגן, גבוהה גם האנרגיה הקינטית (המהירות) של הפוטו-אלקטרון הנפלט מהאשלגן, מפני שלפוטון הפוגע ישנו "עודף" גדול יותר של אנרגיה. הסבר זה נכון כמובן לכל מתכת מוארת, אך לא בצבעים המסוימים שצוינו כאן ואשר תקפים ספציפית לאשלגן. כשנאמר לאיינשטיין שניוטון סבר אף הוא שהאור עשוי חלקיקים הוא השיב: "ניוטון צדק, אבל מהסיבות הלא נכונות". אכן, ניוטון אשר חי במאה ה-17, בטרם התבסס המודל הגלי של האור, הניח שהאור הוא שטף של חלקיקים.

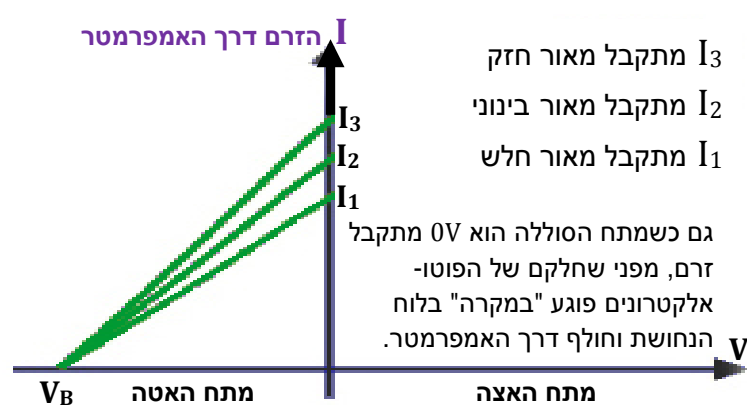
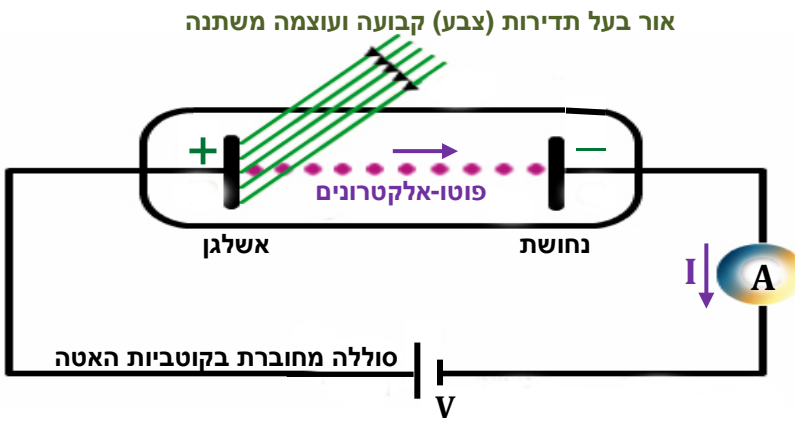
- לאלקטרונים הנפליטים מחומר כתוצאה מאור הפוגע בו קוראים "פוטו-אלקטרונים".
- נאמר קודם שכאשר מגבירים/מחלישים את עוצמת האור, מהירות פליטתם של הפוטו-אלקטרונים אינה משתנה. אין באמירה זו כדי לטעון **שכל** הפוטו-אלקטרונים נפליטים מהמתכת באותה המהירות. המהירים שבהם נפליטים במהירות v_{max} (ומהווים את מרבית הפוטו-אלקטרונים), אך ישנם תמיד מספר פוטו-אלקטרונים שנפליטים במהירות נמוכה יותר. אלה האחרונים אינם "מעניינים" אותנו. אנו מתעניינים רק בפוטו-אלקטרונים אשר נפליטים במהירות הגבוהה ביותר.
- בהמשך נדבר על זרם אלקטרונים, ובאופן חריג נגדיר את **כיוון תנועתם ככיוון הזרם** למרות היותם שליליים. בעבר הגדרנו תמיד את הכיוון ההפוך ככיוון הזרם, בשל המוסכמה העולמית שכיוונו של זרם חשמלי ייבחר תמיד ככיוון תנועתם של מטענים חיוביים, גם אם בפועל אלה הם מטענים שליליים אשר נעים בכיוון ההפוך.

מהלך הניסוי חלק 1: השפעת עוצמת האור



(זרם הרוויה) ואינו גדל עוד. מדוע? כי קצב פליטת האלקטרונים מהאשלגן אינו גבוה מספיק, כך שהאלקטרונים הזמינים לזרימה "אוזלים". אם יגבה קצב פגיעת הפוטונים באשלגן יגבה בהתאם גם קצב פליטת הפוטו-אלקטרונים מהאשלגן, ואכן, כאשר מגבירים את עוצמת האור מתחזק הזרם בהתאמה ומתייצב על ערך מרבי (ערך רוויה) גבוה יותר. **עוצמת האור הפוגע באשלגן (מספר הפוטונים הפוגעים באשלגן בכל שנייה) מכתיבה את קצב פליטת הפוטו-אלקטרונים ממנו (מספר הפוטו-אלקטרונים הנפלטים מהאשלגן בכל שנייה).**

נסביר כעת את מהלך הניסוי שעל פיו הסיק איינשטיין את מסקנותיו:
 אור בעל **תדירות מסוימת** (ירוק בדוגמה זו) פוגע בלוח אשלגן וגורם לפליטתם של פוטו-אלקטרונים ממנו. ממול ללוח האשלגן אשר מחובר להדק השלילי של סוללה, ישנו לוח נחושת אשר מחובר דרך אמפרמטר להדק החיובי שלה. במצב זה נוצר בין שני הלוחות שדה חשמלי שכיוונו שמאלה. תחת השפעתו **מואצים ימינה** הפוטו-אלקטרונים שנפלטו מהאשלגן ועוברים דרך לוח הנחושת, האמפרמטר והסוללה בחזרה אל לוח האשלגן. כל עוד לוח האשלגן מואר, האלקטרונים שחזרו אליו דרך הסוללה נפלטים ממנו מחדש והתהליך חוזר על עצמו. כעת מגביהים בהדרגה את מתח הסוללה כך שהשדה החשמלי מתחזק בהדרגה ועימו גם תאוצת הפוטו-אלקטרונים. האמפרמטר מורה על זרם הולך ומתחזק, כצפוי, מאחר ומהירותם של הפוטו-אלקטרונים החולפים דרכו גדלה בהדרגה כך שיותר מהם חולפים דרכו בכל שנייה. אך כשממשיכים להגביה את מתח הסוללה אל מעבר לערך מסוים, מתייצב הזרם על ערך מרבי כלשהו



כעת הופכים את קוטביות הסוללה כך שלוח האשלגן מחובר להדק החיובי שלה ולוח הנחושת להדק השלילי. בקוטביות זו **המוגדרת שלילית** כיוונו של השדה החשמלי הוא ימינה, כך שכעת **מואצים** הפוטו-אלקטרונים שנפלטו מהאשלגן ולא מואצים. מתח הסוללה מוגבה בהדרגה (בקוטביות שהוגדרה שלילית) ועימו מתחזקים השדה החשמלי ותאוצת הפוטו-אלקטרונים. האמפרמטר מורה על זרם הולך ונחלש, כצפוי, מכיוון שמהירות הפוטו-אלקטרונים המגיעים אל לוח הנחושת והחולפים דרכו הולכת ופוחתת. כשמתח הסוללה מגיע לערך מסוים המכונה **"מתח העצירה"** - V_B , האמפרמטר מורה 0.

זאת מכיוון שבמתח זה האלקטרונים **נעצרים** ממש עם הגיעם אל לוח הנחושת (ואז "נופלים" בחזרה אל עבר לוח האשלגן), כך שאינם עוברים כלל דרך האמפרמטר. אם ממשיכים להגביה את מתח הסוללה, האלקטרונים נעצרים עוד לפני שהגיעו אל לוח הנחושת, ואז "נופלים" בחזרה אל לוח האשלגן. **עוצמת האור אינה משפיעה על מתח העצירה** (כפי שניתן להסיק מהגרף), **ז"א אינה משפיעה על מהירות הפליטה של הפוטו-אלקטרונים.**

מהלך הניסוי חלק 2: השפעת תדירות האור

כעת חוזרים על הניסוי כשתדירות (צבע) האור משתנה אך עוצמתו נותרת קבועה.

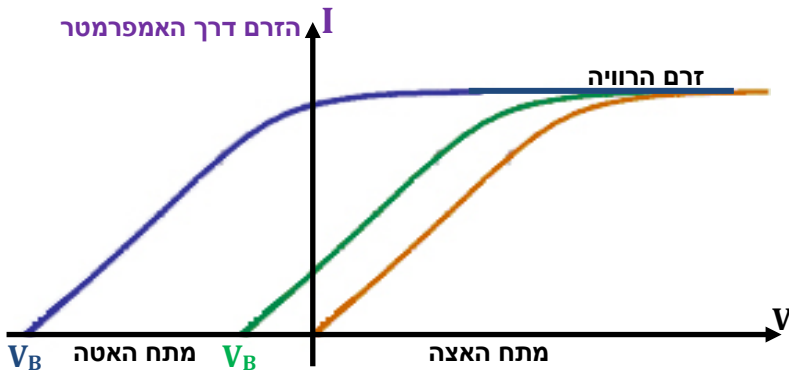
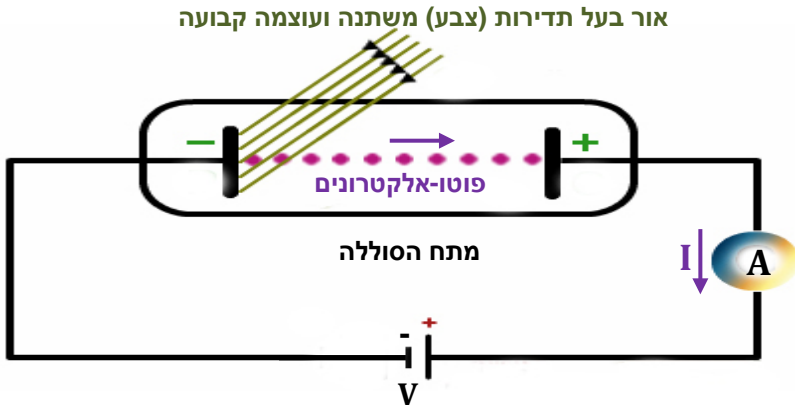
כמו קודם, בשלב הראשון מואצים הפוטו-אלקטרונים ימינה (חלקו החיובי/ימני של גרף הזרם), ואנו רואים כי זרם הרוויה אינו תלוי בתדירות (צבע) האור. מדוע? מפני שזמינות הפוטו-אלקטרונים תלויה בעוצמת האור ולא בתדירותו, וזמינות זו היא שמהווה את "צוואר הבקבוק" באשר לעוצמת הזרם שמתקבל.

תדירות (צבע) האור אינה משפיעה על קצב פליטת הפוטו-אלקטרונים מהאשלגן (מספר הפוטו-אלקטרונים הנפלטים מהאשלגן בכל שנייה).

כעת הופכים את קוטביות הסוללה כך שהפוטו-אלקטרונים הנפלטים מהאשלגן מואטים (חלקו השלילי/שמאלי של גרף הזרם).

אנו רואים שכלל שגבוהה יותר תדירות האור הפוגע באשלגן גבוהה יותר גם מתח העצירה, ז"א גבוהה יותר מהירות הפליטה של הפוטו-אלקטרונים.

הסיבה לכך היא שפוטון "כחול" אנרגטי יותר מפוטון



"ירוק" אשר אנרגטי יותר מפוטון "כתום", ולאחר שהפוטון הפוגע השקיע חלק מהאנרגיה שלו בשחרור פוטו-אלקטרון מהאשלגן, הוא מעניק לו את יתרת האנרגיה שעוד נותרה לו כאנרגיה קינטית. אצל פוטון "כחול" גדולה יתרת אנרגיה זו פי ארבעה מאשר אצל של פוטון ירוק, ולכן מהירות הפליטה ב"כחול" גבוהה פי שניים מאשר ב"ירוק" (ראה איור ראשון בסיכום זה).

שימו לב לכך שתדירות הצבע הכתום מהווה את תדירות הסף בעבור אשלגן, ז"א הפוטון הכתום מצליח אומנם לשחרר פוטו-אלקטרון מאטום האשלגן (ליינן את אטום האשלגן), אך יתרת האנרגיה שלו היא אפס וכמוה גם מהירות הפליטה של הפוטו-אלקטרון. לאור זאת לא נדרש בכתום מתח עצירה, כי הפוטו-אלקטרון ממילא לא יגיע אל לוח הנחושת (הוא נותר "מרחף" ליד לוח האשלגן). כדי שיעל אל לוח הנחושת, יש להאיץ ימינה באמצעות חיבור הסוללה בקוטביות האצה.

תדירות (צבע) האור מכתיבה את מתח העצירה, ז"א את מהירות הפליטה של הפוטו-אלקטרונים. ככל שתדירות האור גבוהה יותר, גבוהה יותר מהירות הפליטה ולכן גבוהה יותר גם מתח העצירה הנדרש.

אלקטרון-וולט (eV)

כשעורכים חישובי אנרגיה ברמת האטום, כדאי להחליף את הג'אול ביחידת אנרגיה קטנה יותר – האלקטרון-וולט.

אלקטרון-וולט הוא האנרגיה הקינטית שרוכש אלקטרון המואץ בהפרש פוט' של 1V

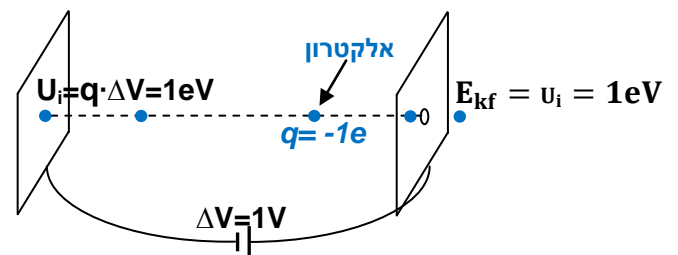
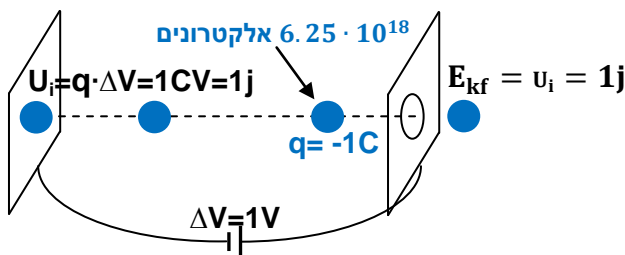
(באופן סימטרי, אלקטרון-וולט הוא האנרגיה הפוט' החשמלית שרוכש אלקטרון הנבלם בהפרש פוט' של 1V).

נזכור כי קולון-וולט (ג'אול) הוא האנרגיה הקינטית שרוכש קולון המואץ בהפרש פוט' של 1V, ונסיק כי מספר האלקטרון-וולטים

$$(eV) \text{ שישנם בג'אול שווה למספר "מטעני האלקטרון" (e) שישנם בקולון: } \frac{1}{eV} = \frac{C}{J} = 6.25 \cdot 10^{18}$$

לכן, כשנרצה לעבור מג'אולים לאלקטרון-וולטים נחלק במטען האלקטרון, וכשנרצה לעבור מאלקטרון-וולטים לג'אולים נכפול

$$X[J] = \frac{X}{1.6^{-19}}[eV] = X \cdot 6.25 \cdot 10^{18}[eV] \quad Y[eV] = Y \cdot 1.6 \cdot 10^{-19}[J] \quad \text{במטען האלקטרון:}$$



אנגסטרם (Å)

בתחום הנראה של הספקטרום האלקטרומגנטי, ועל אחת כמה וכמה בתחום העל-סגול, הגלים קצרים מאוד. נוח לכן לעבוד ב"ננומטרים" ($1nm = 10^{-9}m$) ואפילו ב"אנגסטרמים" ($1\text{Å} = 10^{-10}m$). אנגסטרם הוא רדיוס ממוצע של אטום, בקירוב, ולכן נוח להשתמש בו למדידת מרחקים ברמה האטומית.

(1) אנרגיית הפוטון שווה למכפלת תדירות הגל שלו (f) בקבוע פלאנק (h): $E_{ph} = h \cdot f$
 $h = 6.63 \cdot 10^{-34} [J \cdot S] = 4.14 \cdot 10^{-15} [eV \cdot S]$ חושב ע"י מקס פלאנק בברלין 1900 מתוך תוצאות ניסוי שערך.

(2) נזכור את משוואת הגל מהשיעור הקודם: $v = \lambda \cdot f$ ואם נכנה את מהירות האור C כמקובל, נקבל: $f = \frac{c}{\lambda}$.

(3) נציב במשוואה (1) ונקבל: $E_{ph} = h \cdot \frac{c}{\lambda}$ (λ במטרים, C במטרים לשנייה, h בג'אול-שנייה או באלקטרון-וולט-שנייה).

(4) נקצר את משוואה (3) ונהפוך אותה לסופר שימושית: $E_{ph} = \frac{12431}{\lambda}$ (λ באנגסטרמים, E_{ph} באלקטרון-וולטים).

(5) משוואת איינשטיין: $E_{ph} = B + E_{kmax}$ (אנרגיית הפוטון הפוגע במתכת, אם היא גבוהה מספיק, שווה לפונקציית העבודה (אנרגיית היינון) של המתכת + האנרגיה הקינטית שרוכש הפוטו-אלקטרון אשר נפלט מהמתכת).

(6) נציב את (4) ב- (5) ונקבל: $\frac{12431}{\lambda} = B + E_{kmax}$ (λ באנגסטרמים, אגף ימין באלקטרון-וולטים).

(7) V_B – מתח העצירה. המתח הנדרש לעצירת הפוטו-אלקטרונים. ערכו בוולט שווה לערכה של E_{kmax} באלקטרון-וולט.

(8) F_{TH} – תדירות הסף. פוטונים בתדירויות נמוכות מזו אינם אנרגטיים מספיק בכדי לקיים את משוואת איינשטיין (5).

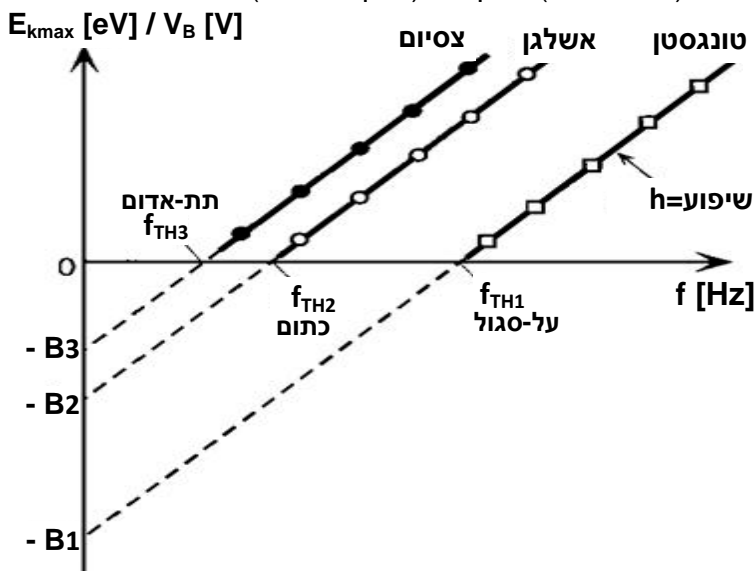
(9) I_{SAT} – זרם הרוויה. הזרם המרבי המתקבל בעוצמת אור מסוימת.

כשמתח ההאצה גבוה מספיק כדי לגרום לכל הפוטו-אלקטרונים הנפלטים לפגוע בלוח הנחושת (ז"א לעבור דרך האמפרמטר), מתקבל זרם הרוויה. במצב זה מספר הפוטו-אלקטרונים הנפלטים בכל שנייה שווה למספר הפוטו-אלקטרונים העוברים דרך האמפרמטר בכל שנייה. נקרא למספר זה n , ואז $I_{SAT} = n \cdot q_e [A]$

(10) B – פונקציית העבודה (או אנרגיית היינון) של המתכת. האנרגיה הדרושה לשחרור אלקטרון מהמתכת.

לכל מתכת ערך אחר של פונקציית עבודה, הנקבע על פי חוזק הקשר שבין גרעין האטום שלה לבין האלקטרונים החיצוניים שלו. אם אנרגיית הפוטון פחותה מפונקציית העבודה של המתכת בה הוא פוגע, לא ייפלט אלקטרון מהמתכת ולא יתקבל אפקט פוטו-אלקטרי. מצד שני, כאשר הפוטון אנרגטי מאוד הוא משחרר לפעמים אלקטרון פנימי יותר של המתכת ומשקיע בכך אנרגיה רבה, כך שהאנרגיה הקינטית הנותרת לאלקטרון פחותה. מסיבה זו נפלטים מהמתכת פוטו-אלקטרונים במהירויות שונות גם כאשר כל הפוטונים הפוגעים בה אנרגטיים באותה המידה. **אנו לוקחים בחשבון רק את הפוטו-אלקטרונים שנפלטים במהירות הגבוהה ביותר**, ז"א רק את אלה ששחררו מקליפה חיצונית של אטום המתכת. בשחרורו של כ"א מהם הושקעו B אלקטרון-וולטים, ומסיבה זו מופיע בנוסחת איינשטיין E_{kmax} ולא סתם E_k .

את משוואת איינשטיין ניתן לכתוב גם כך: $E_{kmax} = h \cdot f - B$ (האנרגיה הקינטית של הפוטו-אלקטרון כתלות בתדירות האור). בהצגה גרפית מתקבל ישר ששיפועו h , החותך את ציר האנרגיה (הציר האנכי) בערך $-B$ (פונק' העבודה) ואת ציר התדירות (הציר האופקי) בערך f_{TH} (תדירות הסף).



באיור מוצגים הגרפים המתאימים לשלוש מתכות שונות.

לצסיום פונק' העבודה הקטנה ביותר, ז"א הכי קל ליינן אותו ולכן תדירות הסף שלו היא הנמוכה ביותר.

לאשלגן פונק' עבודה בינונית, וכך גם תדירות הסף שלו.

לטונגסטן פונק' העבודה הגדולה ביותר, ז"א הכי קשה ליינן אותו ולכן תדירות הסף שלו היא הגבוהה ביותר.