

**פיזור קומפטון: אימות נוסחאת קומפטון - הקשר בין אורכי הגל הפוגעים והיוצאים בזווית הפיזור של הפוטונים, וניסיון לאימות נוסחאת קליין נישונה - קשר בין זווית הפיזור ואורכי הגל הפוגעים והיוצאים לעוצמת הפיזור**

שם: נתיב מאור | ת"ז: 319002911 | דוא"ל: [nativ.maor@campus.technion.ac.il](mailto:nativ.maor@campus.technion.ac.il)

שם: דור חי שחם | ת"ז: 318258555 | דוא"ל: [dor-hay.sha@campus.technion.ac.il](mailto:dor-hay.sha@campus.technion.ac.il)

June 17, 2023

## תקציר

בניסוי זה בחנו את תופעת הפיזור המתרחשת כאשר פוטונים פוגעים באלקטרונים חופשיים. דימינו אלקטרונים חופשיים ופיזרנו בעזרתם קרן פוטונים בתחום  $Xray$ . מערכת הניסוי הורכבה מתא  $Xray$  ובתוכו גלאי שניתן לשלוט בזווית שלו ביחס לדוגמית שממוקמת על הציר האופטי ומהווה מקור לאלמנטים המפזרים (במקרה שלנו אלקטרונים חופשיים בפלקסיגלס). לאחר כיוול המערכת המאפשר המרה בין ערוץ בגלאי  $MCA$  לאנרגיה המתאימה לו (בעזרת דוגמית שקווי הפליטה שלה ידועים לנו), בדקנו את הקשר בין אורכי הגל הפוגעים והיוצאים מהפיזור בזוויות שונות. ציפינו שהקשר יקיים את נוסחאת קומפטון ואכן התקבלה התאמה טובה לכך מתוצאות הניסוי. הסקנו מההתאמה לנוסחת קומפטון את אורך גל קומפטון של האלקטרונים ומכך הסקנו את המסה שלהם, קיבלנו תוצאה שמכילה את הערך המקובל בספרות למסת האלקטרונים במרווח של שתי סטיות תקן. נוסף על כך, בדקנו את הקשר המתקבל בין זווית הפיזור ואורכי הגל הפוגעים והיוצאים של הפוטונים לעוצמת הפיזור והשווינו את הקשר לנוסחת קליין נישנה המנבאת קשר זה משיקולים תיאורטיים, קבלנו שאין התאמה בין הנוסחא למתקבל מהניסוי, נדון על פער זה בדיון ותוצאות.

## מבוא

לשם דימוי מקור האלקטרונים החופשיים מהם הפוטונים מפוזרים השתמשנו בדוגמית פלקסיגלאס בצורת מנסרה מלבנית. בפלקסיגלאס יש אלקטרונים קוואזי-חופשיים, שהם אלקטרונים שאנרגית הקשר שלהם היא נמוכה מאוד בהשוואה לאנרגיה של הפוטונים הפוגעים בהם, ולכן הם מדמים בצורה טובה אלקטרונים חופשיים לשם הניסוי. הדוגמית הוצבה בתוך תא  $Xray$  שבחלקו השמאלי שפופרת  $Xray$  המכילה אטומי  $Mo$  הפולטת קרינת  $Xray$  בתחום הקווים האופייניים ל- $Mo$ . הקרינה עוברת אל התא הימני דרך חריץ, כשבתא הימני מוקמה זרוע שציר הסיבוב שלה ממוקם על הציר האופטי של הקרן ועליו הוצבה דוגמית הפלקסיגלאס, כשבסוף הזרוע הוצב גלאי שניתן לקבוע את הזווית שלו ביחס לדוגמית. הקרן פוגעת בדוגמית ומפוזרת לכל הכיוונים ובין היתר גם אל הגלאי.

מערכת הניסוי מוצגת בתמונה הבאה:



**תרשים 1:** מערכת הניסוי. משמאל יחידת ה- $X-ray$  המכילה את שפופרת ה- $X-ray$  בתא השמאלי ותא ימני עם הגלאי והזרוע המחזיקה את הדוגמית.

חלק מקרינת הפיזור נקלט על ידי הגלאי שקריאותיו מוצגות בעזרת  $MCA$  (multichannel – analyzer) כמספר פולסים שהתקבלו בערוץ מסוים בגלאי. בגלאי איתו עבדנו אנו מצפים (בעקבות הוראות יצרן) שההמרה בין ערוץ הנקלט לאנרגיה הנקלטת תהיה המרה לינארית:

$$(1) \quad E = a \cdot C + b$$

כש  $E$  אנרגיה ביחידות  $[keV]$ ,  $C$  הוא הערוץ (חסר יחידות)  $b,a$  הם קבועים של ההמרה שלהם יחידות של  $[keV]$  גם כן.<sup>4</sup> את המרה זו עשינו בעזרת כיוול מדוגמית עשויה סגסוגת שמרכיביה ידועים לנו. כמו כן, האנרגיה של הפוטונים מתקשרת לאורך הגל שלהם על ידי הנוסחא הבאה

$$(2) \quad E = h \frac{c}{\lambda} \Rightarrow \lambda = \frac{hc}{E}$$

כש  $h - [eV \cdot S]$  קבוע פלאנק,  $c - [\frac{m}{sec}]$  מהירות האור,  $E$  האנרגיה של הפוטון ב  $[eV]$  ו  $\lambda$  אורך גל הפוטון ב  $[m]$ . בעזרת הקשר הנ"ל ושיקולים של שימור אנרגיה ותנע נקבל את הקשר המתאר את פיזור קומפטון:

$$(3) \quad \lambda' - \lambda = \frac{h}{m_e} c (1 - \cos \theta)$$

כש  $\lambda - [m]$  אורך הגל הפוגע,  $\lambda' - [m]$  אורך הגל המפוזר,  $m_e - [kg]$  מסת חלקיק הפיזור (שבמקרה שלנו הוא אלקטרון) ו  $\theta - [rad]$  זווית הפיזור.

נוסף על כך, מפיתוחים הנובעים מאלקטרו דינמיקה קוונטית ( $QED$ ) ניתן לקבל את חתך הפעולה הדפרנציאלי של פיזור קומפטון (שהוא פרופורציוני לעוצמת הקרן היוצאת המתגלת בגלאי לפי הגדרה) מהגדלים הידועים לנו מהנוסחא הקודמת:

$$(4) \quad I_{out}(\theta) \propto \frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{1}{2} r_e^2 \left( \frac{\lambda}{\lambda'} \right)^2 \left( \frac{\lambda}{\lambda'} + \frac{\lambda'}{\lambda} - \sin^2 \theta \right)$$

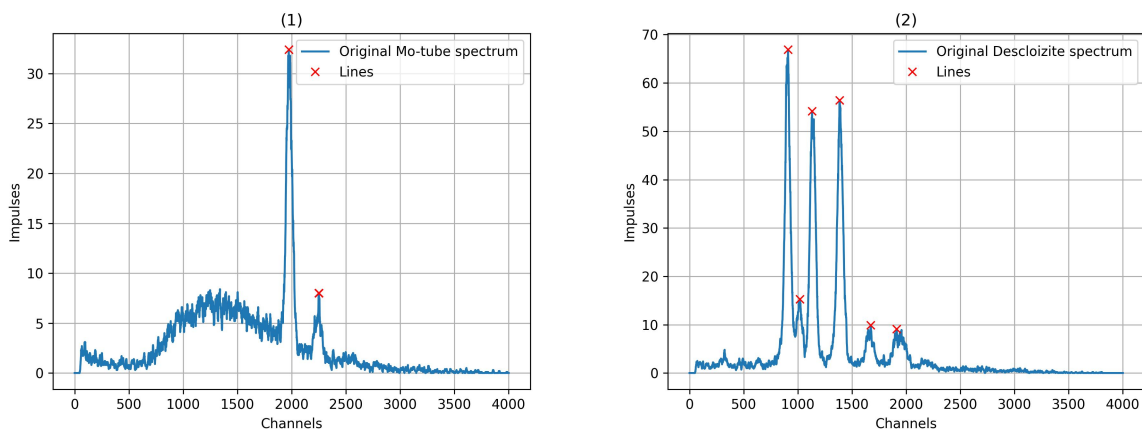
כש  $I_{out}$  הוא גודל פרופורציוני לעוצמה של הקרינה המתגלת בגלאי,  $\frac{d\sigma}{d\Omega} - [m^2]$  חתך הפעולה הדפרנציאלי ו  $r_e[m]$  הוא "רדיוס האלקטרון הקלאסי".

## תוצאות הניסוי

כיוול המערכת:

הכנו את מערכת הניסוי המתוארת במבוא. קבענו את  $offset$  להיות 3 וה  $gain$  להיות 2 בשביל להעלים את רעשים ולקבל תמונה מלאה של הערוצים בהם נקלטים אותות בהתאמה.

מידה של הקרינה של המערכת בשביל לקבל מדידות של  $Mo$ . לאחר מכן מדדנו את הספקטרום של  $Descloizite$  ( $PbZn(OH)VO_4$ ). התקבלה ההיסטוגרמות הבאות:

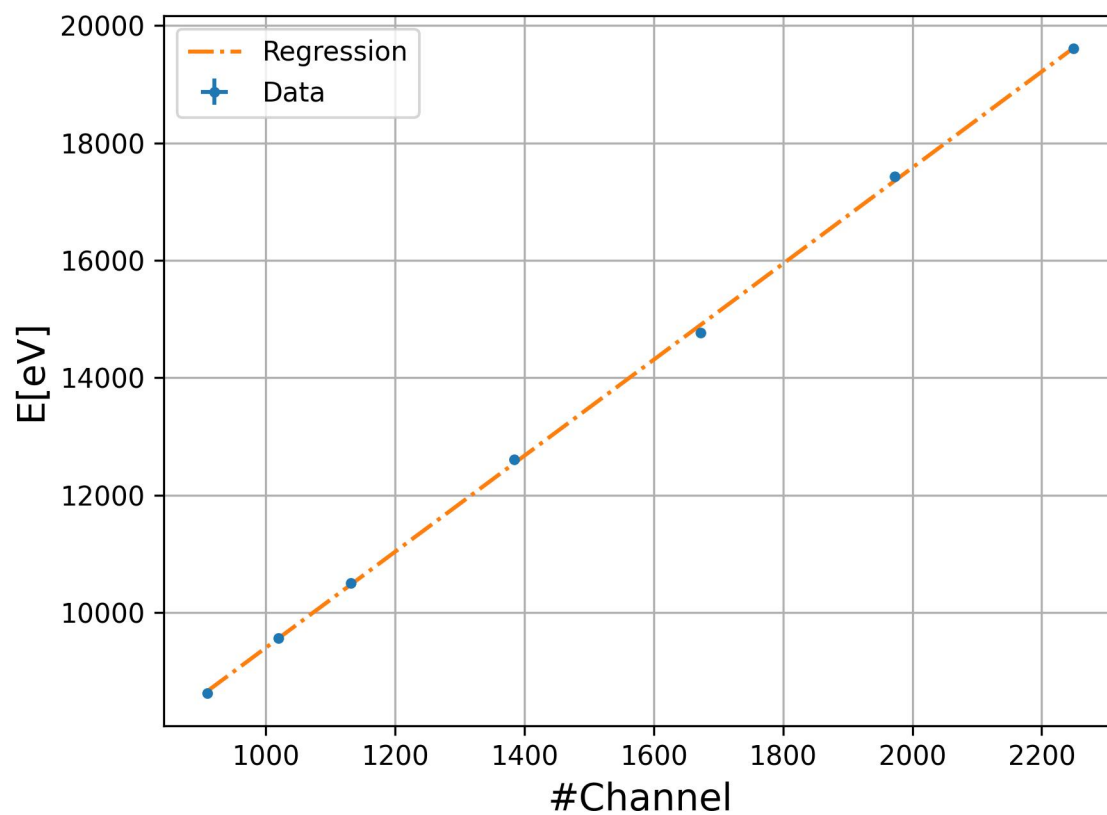


**היסטוגרמה 1-2:** היסטורגמה (1) מדידת  $Mo$  והיסטורגמה (2) מדידת  $Descloizite$ .

מספר הפולסים שנקלטו כפונקציה של מספר הערוץ. ב  $X$  מסומנים המקסימום אשר זוהו כקווי הפליטה.

זיהינו את השיאים שהתקבלו והתאמנו אותם לאנרגיות שמתאימות לקווי הפליטה המוכרים של יסודות אלו (במקרה של  $Descloizite$  - היסודות שמרכיבים אותו).

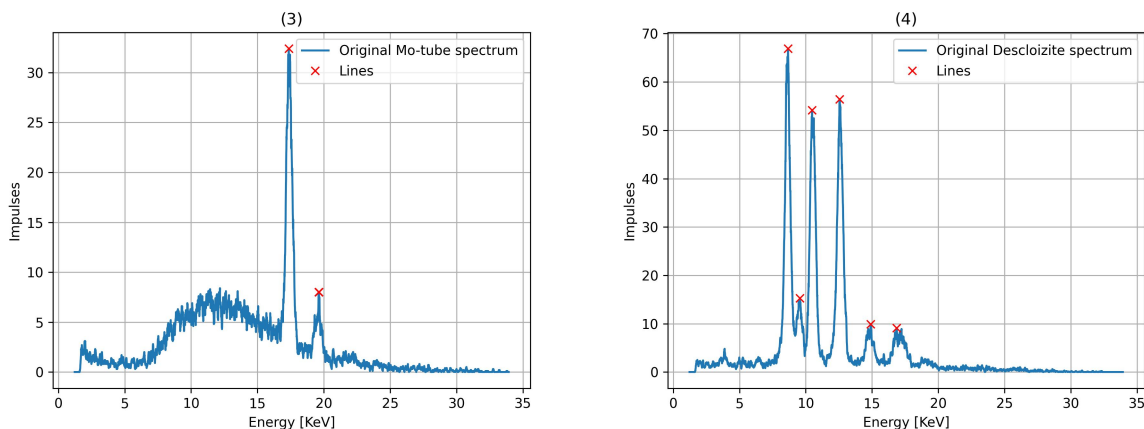
ביצענו רגרסיה לינארית להתאמה לפי נוסחא (1), התקבלו התוצאות הבאות:



**גרף 1:** אנרגיה כפונקציה של מספר הערוץ. הנקודות הכחולות הן הנקודות שנמדדו והקו הכתום מייצג את ההתאמה הלינארית.

ניתן לראות באופן איכותי שהתקבלה התאמה לינארית טובה מאוד. מתוך הרגרסיה קיבלנו את המקדמים של נוסחא (1) אשר מהווה המרה בין ערוצי ה-MCA לאנרגיות.

להלן ההמרה לאנרגיות של המדידות שביצענו לשם הכיול:



**היסטוגרמה 3-4:** היסטורגמה (3) מדידת *Mo* והיסטורגמה (4) מדידת *Descloizite*.

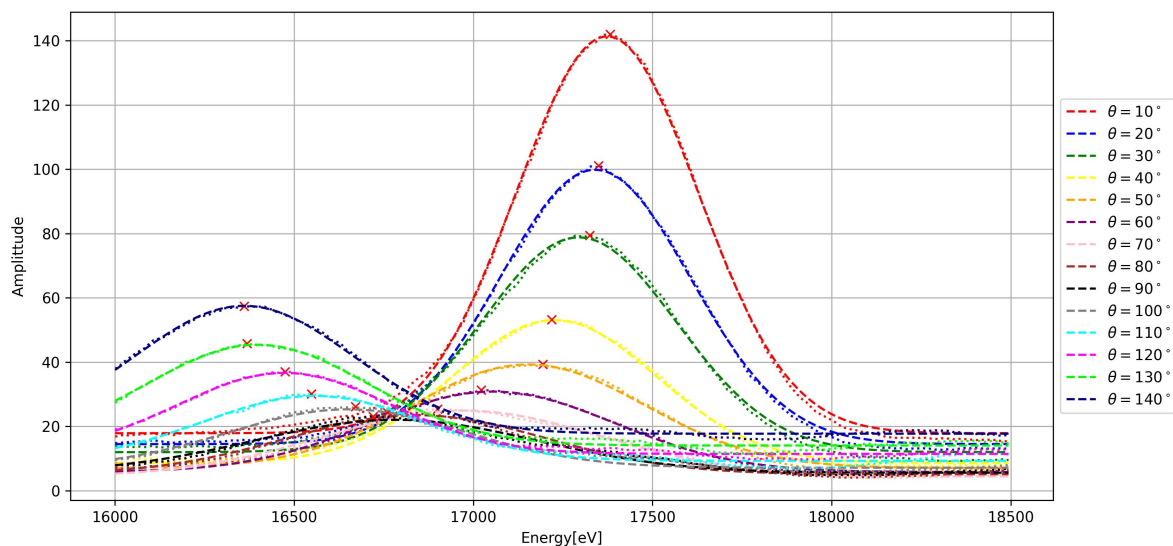
מספר הפולסים שנקלטו כפונקציה של האנרגיה. ב- $X$  מסומנים המקסימום אשר זוהו כקווי הפליטה.

#### מדידת הפיזור:

הוצאנו את דוגמית *Descloizite* ומיקמנו במערכת דוגמית פלקסיגלס. בשביל למדוד את האנרגיה המתפזרת כתלות בזווית ביצענו מדידות במשך זמן קבוע של 5 דקות לכל זווית של הראש המודד בין  $10^{\circ}$  ל- $140^{\circ}$  ביחס לדוגמית. הסיבה לזמן הקבוע היא היא שקצב הפליטה פורפורציוני לעוצמה (לאמפליטודה) ולכן בשביל למדוד את העוצמה יש למדוד את הקצב ומכאן שהזמן חייב להיות קבוע.

ביצענו התאמה לגאוסין של כל מדידה ובעזרתו זיהינו את עוצמת המדידה המקסימלית והאנרגיה בה היא מתקבלת כאשר נעזרנו בכיול בשביל להמיר את הערוצים לאנרגיות.

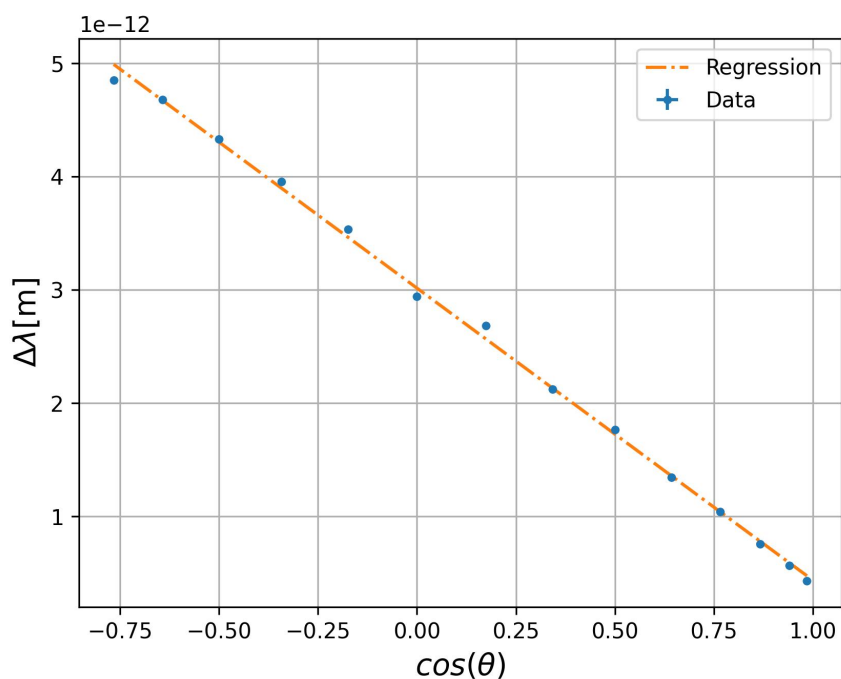
התקבל הגרף הבא:



**גרף 2:** עוצמת הפיזור בזוויות שונות כפונקציה של האנרגיה שנמדדה. ב- $X$  אדום מסומנים השיאים שזוהו.

מתוך השיאים חילצנו את האנרגיות בהן התקבלו השיאים ומנוסחא (2) חילצנו את אורכי הגל המתאימים.

ביצענו רגרסיה לפי הקשר בין זווית הפיזור לשינוי באורך הגל לפי נוסחא (3) התקבל הגרף הבא:



**גרף 3:** השינוי באורך הגל במטרים כפונקציה של קוסינוס זווית הפיזור. הנקודות הכחולות הן הנקודות שנמדדו והקו הכתום מייצג את ההתאמה הליניארית.



ניתן לראות התאמה איכותית טובה כמצופה לפי הנוסחא לפיזור קומפטון. מתוך הרגרסיה חילצנו את אורך גל קומפטון לפי נוסחא (3) והתקבל

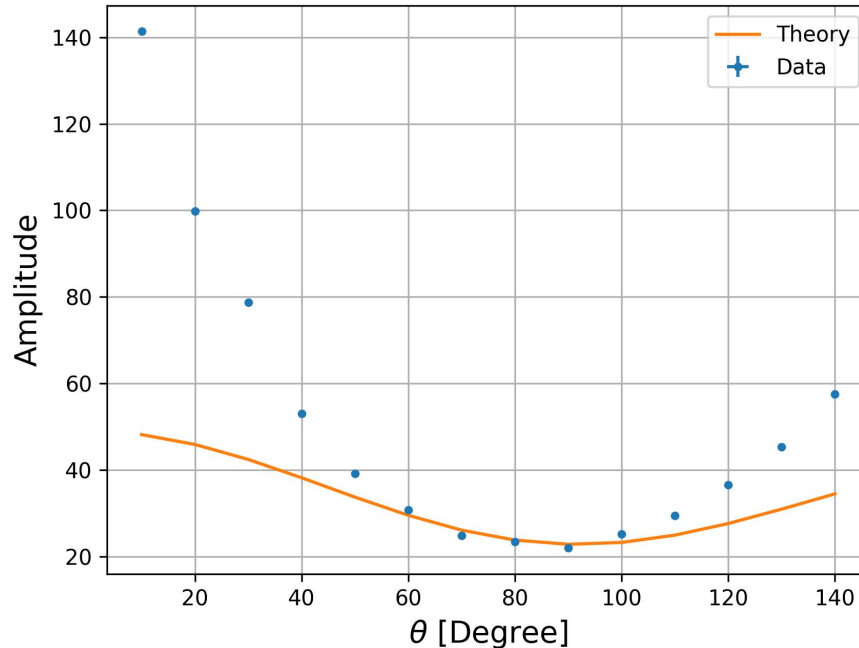
$$\lambda_e = (2.56 \pm 0.03) \cdot 10^{-12} m$$

כאשר השגיאות חולצו מהרגרסיה הלניארית והשגיאות הנגררות חושבו לפי הנוסחא בנספח. תוצאה זו מכילה את הערך התיאורטי  $\lambda_e^{theory} = 2.51 \cdot 10^{-12} m$  במרווח של שתי סטיות תקן. בנוסף, מאורך גל קומפטון חולצה מסת האלקטרון לפי נוסחא (3) והתקבל

$$m_e = (8.9 \pm 0.1) \cdot 10^{-31} kg$$

תוצאה זו מכילה את הערך התיאורטי  $\lambda_e^{theory} = 9.1 \cdot 10^{-31} kg$  במרווח של שתי סטיות תקן.

לבסוף שרטטנו את המדידות של האמפליטודה כתלות בזווית הפיזור והשוונו לתוצאות התיאורטיות לפי נוסחת קליין-נשינה (4), התקבל הגרף הבא:



גרף 4: אמפליטודת הפיזור כפונקציה של זווית הפיזור במעלות. הנקודות הכחולות מייצגו תאית המדידות והקו הכתום את הערך התיאורטי.

ניתן לראות איכותית התנהגות דומה אך אין התאמה ממשית בין התוצאות הנסיוניות לתיאורטיות.

## דיון בתוצאות

## מסקנות

## מקורות מידע

(1) תדריך \_\_.

## נספח

- הנוסחא בה השתמשנו לחישוב השגיאות הנגררות בניסוי:

$$\delta F = \sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial x} \delta x\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial y} \delta y\right)^2 + \dots}$$

כאשר  $\delta x, \delta y, \dots$  הן השגיאות של  $x, y, \dots$  ו- $\delta F$  היא השגיאה הנגררת של  $F$ , שהיא פונקציה של המשתנים  $x, y, \dots$ .

- הנוסחא בה השתמשנו לחישוב השגיאה היחסית בין הערכים המדודים לתיאורטיים בניסוי:

$$\xi_{rel \ err} = \frac{\delta v}{v} \cdot 100\%$$