

קרינה גרעינית

מילות מפתח:

קרינה גרעינית, רדיואקטיביות, מונה גייגר Geiger, התפלגות פואסון, התפלגות גאוס

הציוד הדרוש: מחשב+תוכנה ייעודית, מונה גייגר, סרגל להחזקת הגייגר, ספק לגייגר, מקורות רדיואקטיביים, חוסמי עופרת.

מטרות הניסוי:

- להכיר את הקרינה הגרעינית ותכונותיה.
- להכיר את השימוש ב"מונה גייגר".
- למדוד את התלות של עוצמת הקרינה במרחק מהמקור.
- למדוד את מקדם הבליעה של עופרת.
- למדוד את ההתפלגות הסטטיסטית של הקרינה הנפלטת ממקור רדיואקטיבי.

1. תיאוריה

1.1 קרינה גרעינית

כל יסוד בטבע מורכב מאטומים. האטום בנוי מגרעין כבד ומאלקטרונים (e^-) הנעים מסביב לגרעין. הגרעין טעון במטען חיובי השווה בגודלו למטען השלילי של כל האלקטרונים באטום כך שבסיכומו של דבר האטום הוא נייטרלי. היסודות השונים בטבע נבדלים זה מזה במטען החיובי של הגרעין ולכן גם במספר האלקטרונים באטום. רדיוס של אטום הוא מסדר גודל של $10^{-10}m=1\text{\AA}$, ואילו רדיוס הגרעין קטן בכחמישה סדרי גודל מרדיוס האטום, כלומר $10^{-15}m$. הגרעין בנוי מפרוטונים (p^+) ונויטרונים (n^0), מסת הפרוטון גדולה פי 1839 ממסת האלקטרון ואילו מסת הנויטרון קרובה מאד למסת הפרוטון. אופיו של האטום נקבע עפ"י מספר הפרוטונים Z שישנם בגרעין, מספר זה נקרא המספר האטומי. מספר זה קובע את מיקומו של האטום בטבלה המחזורית של היסודות בטבע. מסת הגרעין (וכן מסת האטום) נקבעת עפ"י המספר הכולל של פרוטונים ונויטרונים בגרעין, מספר זה נקרא מספר המסה A . ליסוד מסוים (המאופיין ע"י המספר

-קרינה גרעינית-

האטומי (Z) ייתכנו מספר איזוטופים הנבדלים זה מזה במספר הנויטרונים בגרעין. התכונות האטומיות של האיזוטופים הן זהות ונקבעות אך ורק עפ"י מספר הפרוטונים Z , אך התכונות הגרעיניות של האיזוטופים תהינה שונות. הסימון המקובל הוא A_ZX כאשר X שם היסוד, לדוגמא ${}^{60}_{27}\text{Co}$ הוא היסוד קובלט המכיל 27 פרוטונים ו $60-27=33$ נויטרונים.

בשנת 1896 גילה Becquerel שאורניום פולט קרינה באופן ספונטני, תופעה זו נקראת רדיואקטיביות. היום ידוע שישנם חומרים רדיואקטיביים (כגון: אורניום, רדיום, סידן ועוד) הפולטים קרינה באופן ספונטני, מקורה של קרינה זו היא בגרעין ולכן נקראת קרינה גרעינית. ישנם שלשה סוגי קרינה:

(1) קרינת α - בה נפלטים מהגרעין גרעיני ${}^4\text{He}$ (שני פרוטונים ושני נויטרונים),



(2) קרינת β - בה נפלטים מהגרעין אלקטרונים כתוצאה מתהליך שבו הופך

נויטרון לפרוטון ונוצר אלקטרון. גם בתהליך זה האטום משנה את טבעו כי מספר הפרוטונים גדל באחד, מסת הגרעין לא משתנה. לדוגמא: ${}^{60}_{27}\text{Co} \rightarrow {}^{60}_{28}\text{Ni} + e^-$.

(3) קרינת γ - בה נפלטים פוטונים (חלקיקים של קרינה אלקטרומגנטית)

אנרגטיים ביותר. בקרינה זו האטום אינו משתנה אלא רק משחרר אנרגיה בצורת פוטון.

בדרך כלל לאחר פליטת α או β התוצר נמצא במצב מעורר (מצב אנרגטי גבוה)

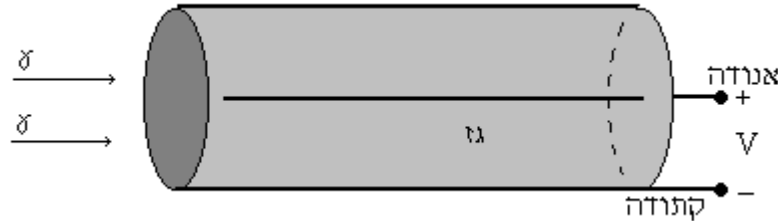
ולכן משתחררת אנרגיה בצורת קרינת γ , כלומר קרינת γ נפלטת בדרך כלל מיד לאחר קרינת α או β .

בניסוי זה נשתמש באחד משני מקורות קרינה, ${}^{60}_{27}\text{Co}$ (קובלט) או ${}^{137}_{55}\text{Cs}$

(צזיום). מקורות אלו פולטים קרינת β וקרינת γ . במהלך הניסוי נספור את החלקיקים הנפלטים מהמקורות וכך נוכל ללמוד על אופי הקרינה הרדיואקטיבית, תלות העוצמה במרחק מהמקור, בליעת הקרינה ע"י חומרים שונים ואופיה הסטטיסטי של הקרינה. המכשיר שבאמצעותו נספור את חלקיקי הקרינה נקרא מונה גייגר.

1.2 מונה גייגר

הגלאי מורכב משפופרת גלילית אשר במרכזה עובר תיל דק מאד המשמש כאנודה, דפנות השפופרת מצופים מתכת ומשמשים כקתודה. האנודה נמצאת במתח חיובי גבוה (500V) ביחס לקתודה. השפופרת עצמה מכילה גז אציל כמו ארגון או תערובת של ארגון וגז מתן בלחץ נמוך. הגלאי מתואר באיור 1.



איור 1: גלאי גייגר- מילר

עקרון הפעולה של השפופרת: חלקיק של קרינה גרעינית חודר לשפופרת, פוגע באטומי הגז שבה ומיינן את אטומי הגז. בשפופרת נוצר יון חיובי הנע אל הקתודה, ואלקטרון שלילי שנתלש מהאטום ונע אל האנודה. השדה החשמלי בסביבת התיל הדק הוא חזק ולכן האלקטרון מאיץ בדרכו אל האנודה ובדרך מיינן אטומים נוספים (יינון משני), כל האלקטרונים החופשיים נמשכים אל האנודה ובהגיעם אליה נוצר פולס של זרם חשמלי. כל פולס מציין את הגעתו של חלקיק קרינה אחד אל הגלאי. מערכת אלקטרונית המחוברת לגלאי, מזהה את הפולס ומונה את מספר החלקיקים. תהליך תנועת האלקטרונים ואיסופם על ידי האנודה הוא מהיר מאד כך שניתן למדוד עד 500 חלקיקים בשניה מבלי שתהיה חפיפה בין הפולסים שנגרמו מחלקיקים שונים. עוצמת הפולס תלויה במתח על האנודה, אם המתח נמוך מדי לא יוצר יינון משני, עוצמת פולס הזרם תהיה קטנה ולא תורגש ע"י מערכת המניה.

יעילות הגלאי במקרה של קרינת α או β היא בקירוב 100% מכיוון שכאשר חלקיקים אלו עוברים בגז הם גורמים בוודאות ליינון ולכן נמנים ע"י הגלאי. במקרה של קרינת γ , הפוטונים עלולים לעבור דרך הגז מבלי ליינן את האטומים ולמעשה לא יורגשו ע"י הגלאי, רק חלק קטן מן הפוטונים מבצע אינטראקציה עם הגלאי וגורם ליינון. יעילות הגלאי עבור קרינת γ היא בסביבות 1%.

1.3 בליעה בחומר

כאשר אלומה של חלקיקי γ (פוטונים) עוברת דרך חומר מוצק, ישנה בליעה של פוטונים ע"י המוצק ועוצמת האלומה קטנה. השינוי בעוצמת האלומה dI פרופורציוני

קרינה גרעינית-

לעוצמה ההתחלתית I ולעובי החומר הבולע x , כלומר $dI = -I\mu dx$. קבוע הפרופורציה μ נקרא מקדם הבליעה של החומר. הפתרון של המשוואה הוא

$$(1) \quad I(x) = I_0 e^{-\mu x} \rightarrow \ln I = \ln I_0 - \mu x$$

בניסוי נמדוד את עוצמת אלומת החלקיקים בעוברה דרך חומר בולע כאשר בכל פעם נשנה את עובי החומר הבולע. מתוך שרטוט גרף של $\ln I$ כתלות ב x נוכל לחשב את מקדם הבליעה של החומר.

1.4 תלות העוצמה במרחק מהמקור

נניח שמקור הקרינה הינו מקור נקודתי הפולט קרינה בצורה איזוטרופית (עוצמה שווה בכל הכיוונים). אם המקור פולט n_0 חלקיקי γ ליחידת זמן אז מספר החלקיקים

ליחידת זמן ליחידת שטח במרחק r מהמקור הוא: $n = \frac{n_0}{4\pi r^2}$. אם נניח שפתח הגלאי

הינו בעל שטח S , אזי מספר החלקיקים המגיעים אל הגלאי יהיה: $n = \frac{n_0}{4\pi r^2} S$.

בפועל, החלקיקים אינם נקלטים בפתח הגלאי אלא בנקודה כלשהי בתוך הגלאי. אם נניח שהבליעה נעשית בעומק ממוצע אפקטיבי d בתוך הגלאי, אזי המרחק הרלבנטי בין המקור לגלאי יהיה $r+d$, מספר החלקיקים יהיה פרופורציוני הפוך לריבוע

המרחק: $n = \frac{C}{(r+d)^2}$ (C הוא קבוע פרופורציה). אנו מעוניינים לוודא קשר זה בין

n ל r , אך מכיוון שהמרחק d אינו ידוע, נרשום את הקשר בצורה הבאה

$$(2) \quad r = \frac{\sqrt{C}}{\sqrt{n}} - d$$

בניסוי נמדוד את מספר החלקיקים כפונקציה של המרחק ונשרטט את המרחק r

כפונקציה של: $\frac{1}{\sqrt{n}}$ על מנת לאשר את הקשר המופיע במשוואה (2).

❖ סרטון המסביר את הנושא.

1.5 סטטיסטיקה של מקור רדיואקטיבי

פליטת הקרינה של חומר רדיואקטיבי אינה מתרחשת בכל הגרעינים בבת אחת אלא מהווה תהליך אקראי בזמן. כלומר אי אפשר לדעת מתי יתפרק כל גרעין אלא ניתן לדבר רק על ההסתברות להתפרקות בתוך פרק זמן מסוים או על המספר הממוצע

של פליטות חלקיקים בפרק זמן נתון. התשובה לשאלה: " מהי ההסתברות למדוד n חלקיקים בפרק זמן נתון ?" נמצאת בפונקציה ההתפלגות $P(n)$.

לדוגמא: נניח שביצענו 24 מדידות והתקבלו התוצאות הבאות: 2, 0, 1, 4, 1, 2, 3, 0, 2, 2, 1, 3, 0, 2, 3, 1, 2, 3, 1, 2, 3. נספור כמה פעמים הופיע כל מספר ונחלק ב 24

הקריאה n	0	1	2	3	4	5	סה"כ
מספר הפעמים	4	6	7	4	2	1	24
ההסתברות P(n)	4/24=0.166	6/24=0.25	7/24=0.292	4/24=0.166	2/24=0.083	1/24=0.042	1

הערך הממוצע הוא $\sum nP(n)=1.875$.

פונקציה ההתפלגות המתאימה להתפרקות רדיואקטיבית היא התפלגות פואסון, התפלגות זו היא התפלגות של משתנה אקראי שלם וחיובי

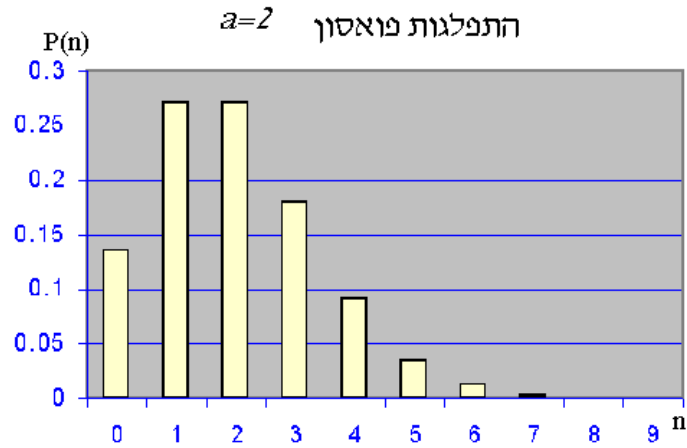
$$(3) \quad P(n) = \frac{a^n}{n!} e^{-a}$$

סך כל ההסתברויות שווה כמובן לאחד: $\sum_{n=0}^{\infty} P(n) = 1$. התכונות של התפלגות

פואסון נקבעות על פי הפרמטר a : הערך הממוצע של מספר החלקיקים ביחידת זמן

הוא: $\langle n \rangle = a$, וסטיית התקן היא: $\sigma = \sqrt{a}$. ההתפלגות מתוארת באיור 2.

-קרינה גרעינית-

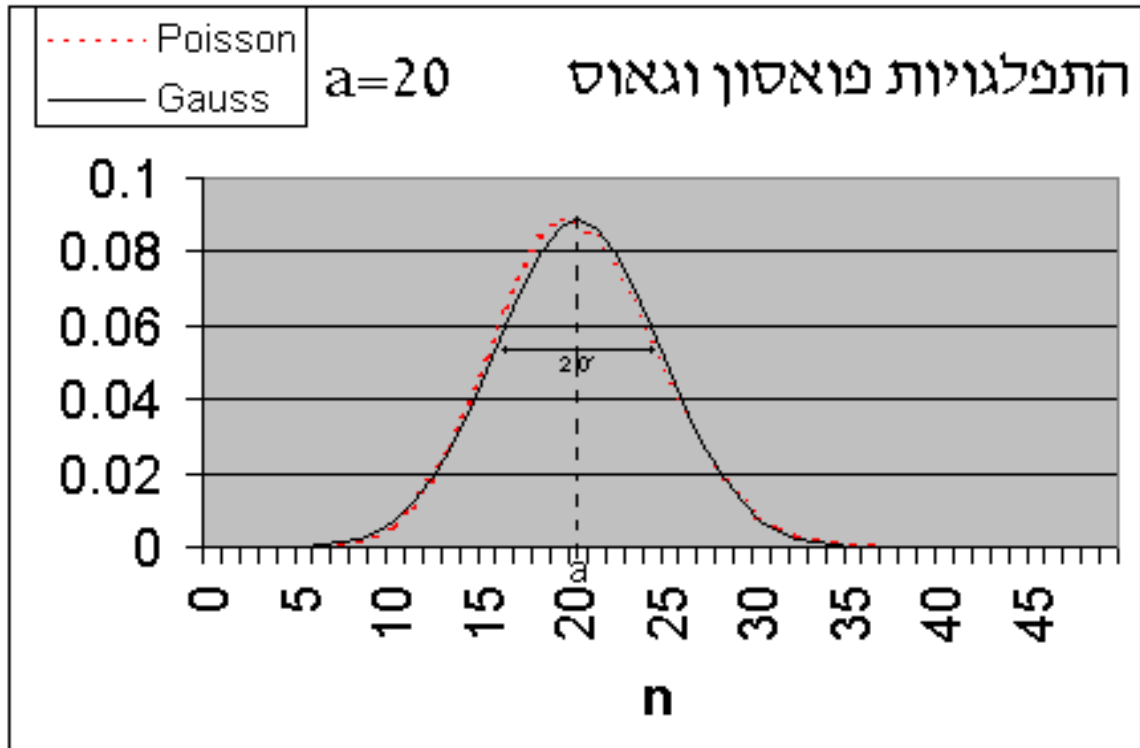


איור 2 : התפלגות פואסון עם $a=2$

כאשר מספר החלקיקים הממוצע ליחידת זמן הוא גדול, ההתפלגות הולכת ונעשית סימטרית סביב הממוצע עד שנעשית דומה להתפלגות גאוס. התפלגות גאוס היא התפלגות של משתנה ממשי רציף x . אך כאשר מדובר במספרים גדולים ניתן לקרב את המספר השלם של החלקיקים באמצעות משתנה רציף $x \rightarrow n$. התפלגות גאוס נתונה ע"י :

$$(4) \quad P(n) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}}$$

כאשר a הוא הממוצע ו σ סטיית התקן. גם כאן סך כל ההסתברות הוא אחד :
 $\int_{-\infty}^{\infty} P(x) dx = 1$. להבהרה ניתן לראות באיור 3 את תיאור הגרפי של התפלגויות גאוס ופואסון עבור $a=20$ כבר בערך זה שני ההתפלגויות כמעט זהות.
 באופן מעשי בניסוי זה, ניתן להניח כי $a > 10$ הוא מספיק גדול ולהניח התפלגות גאוסית.



איור 3 : התפלגות פואסון והתפלגות גאוס $a=\sigma^2=20$

ישנה תכונה חשובה מאד של גדלים נמדדים אשר לקוחים מתוך התפלגות פואסון או גאוס. כאשר אנו מודדים מדידה יחידה כגון מדידת מספר חלקיקי γ ביחידת זמן באמצעות מונה גייגר, אם קיבלנו את התוצאה n אז הערכת השגיאה במדידה זו היא \sqrt{n} .

בניסוי נבחן את ההתפלגות של מספר החלקיקים ביחידת זמן בשני מקרים. במקרה אחד הערך הממוצע יהיה קטן וההתפלגות תהיה התפלגות פואסון, ובמקרה השני הערך הממוצע יהיה גדול ונצפה להתפלגות גאוס.

1.6 עבודת הכנה

השתמש במשוואה (3) המתארת את התפלגות פואסון

1. הראה שמתקיים $\sum P(n)=1$.

(רמז : השתמש בהגדרת האקספוננט באמצעות טור חזקות)

2. רשום איזה סוג ים של קרינה משנה \ ים את היסוד?

3. ציין לאיזה קצב פליטה מתאימה התפלגות פואסון ולאיזה מתאימה והתפלגות גאוסנית .

-קרינה גרעינית-

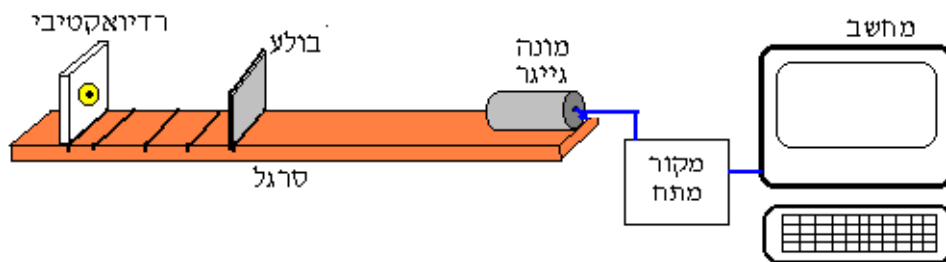
4. במרחק של 10 ס"מ מהגלאי הונח מקור. מספר הקריאות הממוצע לשנייה שהתקבל היה 16. כאשר קורב המקור למרחק של 5 ס"מ מהגלאי, מספר הקריאות הממוצע לשנייה שהתקבל היה 36. מהוא המרחק האפקטיבי בתוך הגלאי.

5. מה צריך להיות עוביו של חומר אשר מקדם הבליעה שלו $\mu = 1.4 \text{ cm}^{-1}$ על מנת להנחית ב- 50% אלומת קרינת גמה?

2. מהלך הניסוי

2.1 מערכת הניסוי

מערכת הניסוי כוללת: מקור רדיואקטיבי, מונה גייגר עם מקור מתח גבוה, סרגל עליו מוצבים המקור והגלאי, לוחות עופרת בולעי קרינה, מחשב עם תוכנה השולטת על ספק המתח ומשך המניה. המערכת מתוארת באיור 4.



איור 4: מערכת לניסוי קרינה גרעינית

המקור הרדיואקטיבי נמצא בתוך לוח פלסטיק, בצידו האחד ישנו נקב ודרכו נפלטת קרינת β וקרינת γ , בצד השני אין נקב ולכן קרינת β הנפלטת בכיוון זה נעצרת ע"י הפלסטיק ורק קרינת γ נפלטת. בניסוי זה אנו מעוניינים בקרינת γ בלבד ולכן יש להציב את המקור כך שהנקב פונה בכיוון ההפוך מהגלאי.

2.2 הנחיות ביצוע

זהירות – הקרינה הרדיואקטיבית מסוכנת כאשר פוגעת בגוף בעוצמה גבוהה.

עוצמת המקורות בניסוי זה הינה נמוכה אך יש להקפיד על הכללים הבאים :

- אין לנגוע ביד במקור רדיואקטיבי, החומר עצמו נמצא בתוך לוחית פלסטיק, יש להחזיק אך ורק בפלסטיק בעת הזזת המקור.
- בזמן ביצוע הניסוי יש להעמיד את המקור והגלאי במרחק של חצי מטר לפחות מהגוף.

2.3 בחירת מתח העבודה של הגלאי

עלינו לקבוע את מתח העבודה של הגלאי כך שיתקבל פולס ברור. בצורה זאת התוצאות תהיינה אמינות ולא תהיינה תלויות בשינויים קטנים במתח האנודה.

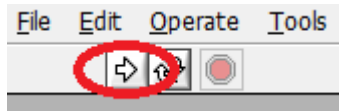
- הציבו את המקור במרחק של כ-1 ס"מ מהגלאי.
- תפתחו את התוכנה "Nuclear Radiation", תבחרו בלשונית של "מתח עבודה" והזינו את הנתונים הבאים :

זמן מדידה – 15 שניות

מתח התחלה- 250 וולט

מתח סיום – 600 וולט

הפרש בין מדידות – 25 וולט



או לאחר הכנסת הנתונים ליחצו על כפתור ההפעלה

על Ctrl-R, לאחר הלחיצה התוכנית תתחיל למדוד את מספר הקריאות עבור מתחים שונים לפי הנתונים שהוכנסו.

בסיום המדידות תתבקשו לבחור שם לקובץ שמכיל את נתוני המדידה (יש לתת שם לקובץ או תיקיה באנגלית).

- שימו לב לכך שעבור מתח נמוך מדי אין קריאות כלל, ואילו במתח גבוה ישנן קריאות. תבחרו את מתח העבודה באמצע האזור שבו מתקבלות הקריאות (בסביבות 500V), מתח זה ישמש אותכם לניסויים הבאים.

2.4 חישוב ממוצע וסטיית תקן עבור מספר מדידות בתנאים זהים

- הציבו את המקור על הסרגל בחרוץ כלשהו. תמדדו את המרחק בין המקור לגלאי r .
- תבחרו בלשונית **מדידת קרינה** בתוכנה. כוונו את בורר המתח למתח העבודה המתאים כפי שמצאתם בניסוי "בחירת מתח העבודה".
- תקבעו את זמן המדידה 5 שניות בשדה משך מדידה.
- בצעו מדידת קרינה 10 פעמים ותרשמו את מספר החלקיקים שנמנו עבור כל מדידה. חישוב ממוצע וסטיית התקן של החלקיקים, הסבירו את התוצאות.

2.5 מדידת עוצמת הקרינה כפונקציה של המרחק

- הציבו את המקור על הסרגל בחרוץ הרחוק ביותר מהגלאי. תמדדו את המרחק בין המקור לגלאי r .
- תבחרו בלשונית **מדידת קרינה** בתוכנה. כוונו את בורר המתח למתח העבודה המתאים כפי שמצאתם בניסוי "בחירת מתח העבודה".
- תבחרו את ערך **משך מדידה** כך, שמספר הקריאות במרחק זה יהיה גדול מ-25 (תבצעו מדידה בודדת על מנת למצוא את משך המדידה המתאים).
- תרשמו את מספר החלקיקים שנמנו ואת המרחק בין המקור לגלאי. מקמו את המקור בחרוץ הבא (קרוב יותר לגלאי) על הסרגל וחזרו על התהליך (עבור זמן זהה לזמן המדידה הראשון).
- חזרו על המדידות כאשר בכל פעם הנכם מקרבים את המקור לחרוץ קרוב יותר לגלאי עד למרחק של כס"מ מהגלאי.
- שרטטו את המרחק r כפונקציה של $\frac{1}{\sqrt{n}}$, בעזרת משוואה (2) התאימו קו ישר לגרף ותמצאו את העומק האפקטיבי של הגלאי d . התחשבו בכך שהשגיאה בכל מדידה היא \sqrt{n} . (n הוא מספר קריאות)

- שרטטו גרף של מספר הקריאות כתלות במרחק והתאימו פונקציה מתאימה. איזו התנהגות צפויה להתקבל? נסו להתאים פונקציה המתאימה לתאוריה.

2.6 מדידת מקדם הבליעה של חומר

- הציבו את המקור במרחק של כ 3 ס"מ מהגלאי. הכינו 5 לוחות עופרת, תמדדו את העובי של כל לוח. בניסוי תתבצענה 6 מדידות ובכל אחת מהם עובי החומר הבולע שונה.
- תבחרו בלשונית **מדידת קרינה** בתוכנה. כוונו את בורר המתח למתח העבודה המתאים כפי שמצאתם בניסוי "בחירת מתח העבודה". הכניסו זמן מדידה 30 שניות.
- הציבו לוח עופרת בין המקור לגלאי, הפעל את המדידה, תרשמו את התוצאה וסמנו אותה ב- I . הערכת השגיאה במדידה כזו היא $\Delta I = \sqrt{I}$.
- חזרו על המדידות כאשר בכל פעם הנכם מוסיפים לוח עופרת נוסף.
- על פי משוואה (1) שרטטו גרף של $\ln(I)$ כפונקציה של עובי העופרת x , מתוך שיפוע הגרף חישבו את מקדם הבליעה של עופרת, השוו לערך מהספרות. **מקדם הבליעה של העופרת** הוא $\mu = 0.081(\text{mm}^{-1})$, **ואלומיניום** $\mu = 0.02(\text{mm}^{-1})$ (לפי Handbook of chemistry and physics 52-nd edition)
- חזרו על התהליך כולו עבור אלומיניום, הכניסו 12 לוחות אלומיניום בין המקור לגלאי ולאחר כל מדידה הסירו 3 לוחות (סה"כ 4 מדידות + 1 ללא לוחות).
- השוו את מקדם הבליעה של האלומיניום למקדם הבליעה של העופרת והסבירו מדוע משתמשים בעופרת לבידוד מקורות רדיואקטיביים ?

2.7 מדידת ההתפלגות הסטטיסטית של הקרינה

בניסוי זה נבצע מספר רב של מדידות בתנאים שווים על מנת לקבל מידע על סוג ההתפלגות. ביחרו בלשונית "סטטיסטיקה", בלוח השליטה ישנה אפשרות לבחור את משך המדידה, מספר המדידות ולבחור סוג התאמה לפונקציה שיוצג בהיסטוגרמה (אופציונאלי).

בלוח הבקרה ניתן לראות במהלך פעולת התוכנית את מספר המדידה הנוכחית, משך המדידה הנוכחית ממוצע הקריאות עד כה ואת סטית התקן .

2.7.1 התפלגות גאוס

- מקמו את המקור במרחק של כ 2 ס"מ מהגלאי והזינו מתח הפעלה מתאים בבורר המתח.
- על מנת לקבל התפלגות גאוסיאנית נרצה שמספר הקריאות הממוצע למדידה יהיה בין 20 ל-30. לשם מציאת זמן המדידה שעבורו מתקבל ממוצע הקריאות הנ"ל, תקבעו את משך המדידה כרצונכם כאשר "מספר המדידות" שווה ל-10. לפי ממוצע הקריאות שמתקבל, הגדילו או הקטינו את זמן המדידה לפי הצורך עד שיתקבל ממוצע קריאות מתאים (הזמן בדרך כלל שאמור להתקבל לקבלת הממוצע הרצוי הינו באזור 0.3 שנייה).
- הזינו את "משך המדידה" שמצאתם ו"מספר מדידות" בין 300 ל-500, תבחרו את אופי ההתאמה והתחילו את המדידה, הגרף העליון מציג את תוצאות המדידות כהיסטוגרמה (וכך גם נשמרים הנתונים בקובץ) והגרף התחתון מציג את התוצאות לפי מספר סידורי של המדידות.
- תפתחו את הקובץ של נתוני ההיסטוגרמה ונרמלו את התוצאות (חלוקה של מספר המדידות בכל עמודה במספר המדידות הכולל), הציגו את הגרף המנורמל בדו"ח המסכם, התאימו פונקציה לתוצאות והסבירו את המאפיינים שלה (שונות, ממוצע).

2.7.2 התפלגות פואסון

- על מנת לקבל התפלגות פואסונית נרצה שמספר הקריאות הממוצע למדידה בודדת יהיה בין 2 ל-5. תמצאו, באופן שהוסבר בסעיף הקודם, את זמן המדידה המתאים לשם קבלת הממוצע הנדרש.
- הזינו את "זמן המדידה" שמצאתם ו"מספר מדידות" בין 300 ל-500 והתחילו את המדידה.
- תפתחו את הקובץ של נתוני ההיסטוגרמה ונרמלו את התוצאות (חלוקה של מספר המדידות בכל עמודה במספר המדידות הכולל), הציגו את הגרף המנורמל בדו"ח המסכם, התאימו פונקציה לתוצאות והסבירו את המאפיינים שלה.