

דו"ח מסכם בניסוי: אופטיקה 2

חלק: _____

שם הבודק: _____

תאריך הבדיקה: _____

ציון הדו"ח: I _____

II _____

שם מדריך הניסוי (שם מלא): נועם פופר

תאריך ביצוע הניסוי: 23.04.23

תאריך הגשת הדו"ח: 07.05.23

הדו"ח מוגש על ידי:

II מאור זילברשטיין
שם פרטי משפחה ת.ז.
214547994

I עידו לארי
שם פרטי משפחה ת.ז.
326335767

חשמל פיזיקה
מסלול הלימוד
מס' קבוצת המעבדה
תת קבוצה Z
מספר עמדה

הערות הבודק לנושאים לקויים בדו"ח:

מטרות הניסוי:

אימות חוק סנל באמצעות ארבע שיטות שונות והשוואת שיטות אלו אחת לשנייה. בנוסף לכך, נחקרו מנורות פליטת גז על ידי סריג עקיפה.

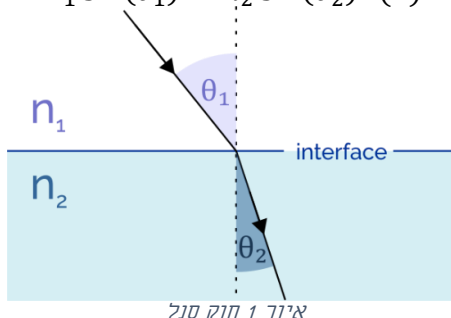
רקע תיאורטי:

כאשר אור נע בתווך מסוים הוא נע במהירות נמוכה ממהירות האור בוואקום. לכן, ניתן להגדיר מקדם שבירה של חומר על ידי היחס בין המהירויות באופן הבא:

$$n = \frac{c}{v} \quad (1)$$

כאשר c היא מהירות האור בוואקום, v היא מהירות האור בתווך n הוא מקדם השבירה. מעקרון פרמה הקובע כי בהינתן שתי נקודות, האור ינוע במסלול שהזמן שייקח לו לעבור אותו הוא מינימלי, ניתן לגזור שני חוקים, חוק ההחזרה וחוק סנל. כאשר קרן אור עוברת בין שני תווכים היא יכולה לחזור לתווך בו היא נמצאת, חוק ההחזרה קובע כי זווית פגיעת הקרן ביחס לאנך של המשטח וזווית ההחזרה ביחס לאנך שוות. חוק סנל קובע כי הקשר בין זווית הפגיעה θ_1 של קרן אור בתווך בעל מקדם שבירה n_1 וזווית היציאה θ_2 של קרן האור בתווך בעל מקדם שבירה n_2 , כמתואר באיור 1 הינו:

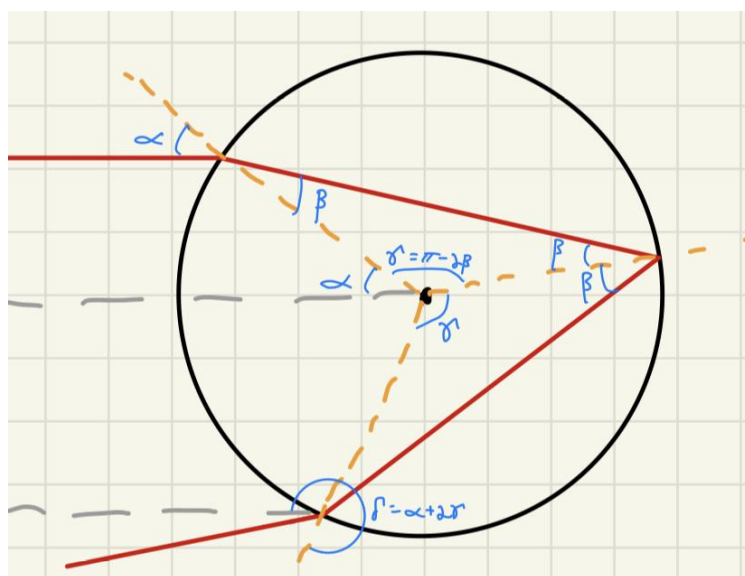
$$n_1 \sin(\theta_1) = n_2 \sin(\theta_2) \quad (2)$$



החזרות בדסקה:

עבור אוויר מתקבל מקדם שבירה 1 בדיוק של יותר מ 3 ספרות משמעותיות. לכן, עבור דסקה עם מקדם שבירה n שמסביבה אוויר מתקבל הקשר הבא מחוק סנל:

$$\sin(\alpha) = n \sin(\beta) \quad (3)$$



איור 2 דסקה עם $N=3$

ניתן לראות מגיאומטריה כי:

$$\delta = \alpha + (N - 1)(\pi - 2\beta) \quad (4)$$

N מוגדר להיות סך הפגיעות של הקרן בדסקה, ו $\delta(N)$ מוגדרת להיות זווית היציאה עבור N פגיעות כמתואר באיור 2. עבור $N > 2$ תתקבל זווית α עבורה δ תהיה מינימאלית. מהשוואת הנגזרת לפי α של (4) לאפס מתקבל:

$$0 = 1 - 2(N - 1) \left(\frac{d\beta}{d\alpha} \right) \quad (5)$$

$\frac{d\beta}{d\alpha}$ יחושב באמצעות דיפרנציאציה ל (3):

$$\frac{d\beta}{d\alpha} = \frac{\cos(\alpha)}{n\cos(\beta)} =^1 \frac{\cos(\alpha)}{n\sqrt{1-\sin(\beta)^2}} =^2 \frac{\cos(\alpha)}{n\sqrt{1-\left(\frac{\sin(\alpha)}{n}\right)^2}} = \frac{\cos(\alpha)}{\sqrt{n^2 - \sin^2(\alpha)}}$$

לאחר הצבה ב (5) מתקבל:

$$0 = 1 - 2(N-1) \frac{\cos(\alpha_{min})}{\sqrt{n^2 - \sin^2(\alpha_{min})}}$$

לאחר העברת אגפים והעלאה בריבוע:

$$\frac{1}{4(N-1)^2} = \frac{\cos^2(\alpha_{min})}{n^2 - \sin^2(\alpha_{min})}$$

$$n^2 - \sin^2(\alpha_{min}) = 4(N-1)^2 \cos^2(\alpha_{min})$$

$$n^2 = (4(N-1)^2 - 1) \cos^2(\alpha_{min}) + \cos^2(\alpha_{min}) + \sin^2(\alpha_{min})$$

$$n^2 = (4(N-1)^2 - 1) \cos^2(\alpha_{min}) + 1$$

$$n = \sqrt{(4(N-1)^2 - 1) \cos^2(\alpha_{min}) + 1} \quad (6)$$

קירוב פונקציה לפרבולה סביב נקודת מינימום:

כאשר רוצים לבצע קירוב לפונקציה סביב נקודה, ניתן להשתמש בטור טיילור הקובע כי ערך הפונקציה f סביב הנקודה x_0 הינו:

$$f(x) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n!} f^{(n)}(x_0) \cdot (x - x_0)^n \quad (7)$$

כאשר מקרבים את הפונקציה בסביבה קטנה מסביב ל x_0 ניתן להתחשב רק באיבר המשמעותי הראשון. עבור נקודת מינימום x_0 מתקבל כי האיבר $f'(x_0) = 0$ ולכן האיבר המשמעותי הראשון יהיה הנגזרת השנייה ומתקבל:

$$f(x) \approx f(x_0) + \frac{1}{2} f''(x_0) \cdot (x - x_0)^2 \quad (8)$$

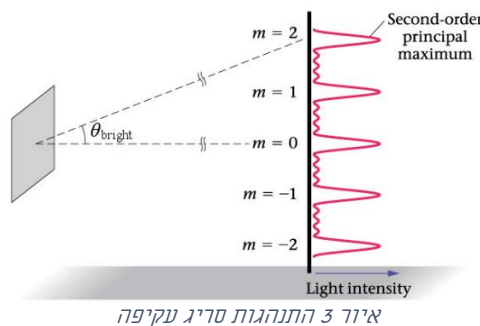
כלומר, עבור סביבה קטנה סביב נקודת מינימום מתקבל כי הפונקציה מתנהגת כמו פרבולה.

סריג עקיפה:

סריג עקיפה הינו רכיב המפצל קרן אור הפוגעת בו למספר קרניים בצורה מחזורית כפי שניתן לראות באיור 3. הסריג מורכב מסדקים קטנים שכאשר האור עובר דרכם נוצרות התאבכויות בוונות והתאבכויות הורסות ולכן נוצרים שיאים. הסריג מפצל את קרן האור למספר שיאים כאשר הזווית של השיא ה n ביחס למרכז היא:

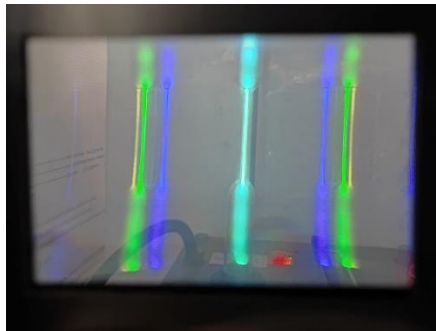
$$\sin(\theta_n) = n \cdot N^* \cdot \lambda \quad (9)$$

כאשר N^* הוא קבוע הסריג המסמל כמות סדקים למטר ו λ זה אורך הגל הפוגע בסריג.



¹ לפי הזהות $\sin^2(x) + \cos^2(x) = 1$
² מנוסחה (3)

ניתן לראות בנוסחה כי הזווית תלויה באורך הגל ולכן כאשר עובר דרך הסריג אור המורכב ממספר אורכי גל הסריג יפצל את האור לפי גלים אלו. ניתן לראות באיור 4 כיצד הסריג מפריד את הצבעים מהמנורה כאשר $n = \pm 1$.

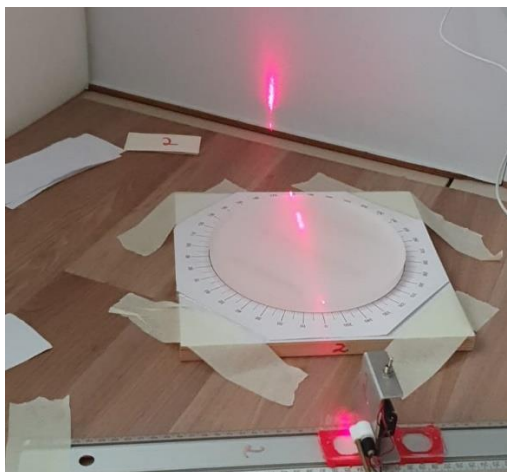


איור 4 מבט דרך סריג עקיפה

מהלך ניסוי

רשימת ציוד חלק א:

- לייזר
- דסקה
- מד זווית ברזולוציה של 0.5°
- מסילה המובילה את הלייזר



איור 5 מערכת ניסוי חלק א

כיוול המערכת:

הלייזר יכוון כך שיפגע בדסקה בזווית 0 וייצא בזווית 180 מעלות לפי נוסחה (3). במהלך הניסוי בשלב בו נדרשו מספר מקסימלי של החזרות בדסקה נמצא לנכון להעלות את גובה הלייזר כך שיכוון במקביל לדסקה. בשלב הכיוון ניתן היה להבחין במריחה בקרן הלייזר עליה יורחב בעיבוד הנתונים.

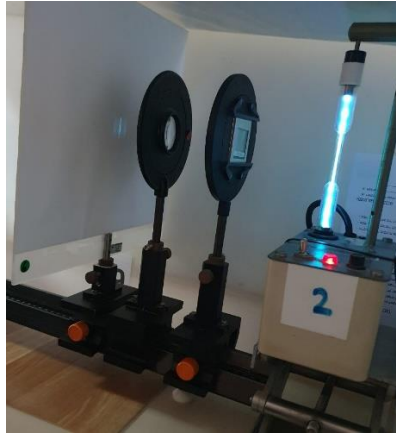
בחלק א' של הניסוי ערכנו מדידות מארבעה סוגים:

1. נמדדה זווית היציאה עבור זוויות פגיעה שונות כאשר זווית הפגיעה התחילה מ 0 עד ל 50. המדידות התבצעו באינטרוולים של 5 מעלות כל פעם. בוצעה התאמה לינארית בין $\sin(\alpha)$ ל $\sin(\beta)$ ולפי נוסחה (3) השיפוע שהתקבל הינו מקדם השבירה. β חושבה באמצעות נוסחה (4) עבור $N = 2$.
2. הלייזר מוקם כך שהתקבל $N = 5$, עבור כל אחת מחמש החזרות נמדדה זווית היציאה. בוצעה התאמה לינארית בין זווית היציאה ל $N - 1$ והשיפוע שהתקבל הינו $2\beta - \pi$ לפי נוסחה (4).
3. נערכו מדידות סביב זווית היציאה המינימלית עבור $N = 3$ ומקדם השבירה חולץ על ידי נוסחה (6).
4. עבור $N = 3$ נמדדה זווית הפגיעה α הגורמת ללייזר להישבר כך שלאחר 2 החזרות הוא יחזור לנקודה בה נשבר לראשונה, במצב זה יתקבל משולש שווה צלעות ולכן $\beta = 60^\circ$. מקדם השבירה חולץ מנוסחה (3).

רשימת ציוד חלק ב:

- סריג עקיפה עם קבוע $570 \frac{1}{mm}$

- מנורת פליטת גז
- סטנד
- סרגל ברזולוציה 0.1 cm
- מיקרומטר ברזולוציה 10^{-6} m



איור 6 מערכת חלק ב
(העדשה מוקמה על מנת להציג את המערכת בצורה טובה יותר אך לא שומשה במדידות)

כיוול המערכת :
ראשית המנורה מוקמה באמצע שדה הראייה של הסריג. אדם התבונן מבעד לסריג העקיפה לעבר המנורה ומיקם את הסריג כך שהצבעים יהיו ברורים כמה שיותר. לאחר מכן, נמדד קוטר המנורה באמצעות מיקרומטר ומוקם סרגל בניצב לציר המנורה כך ששנתותיו מכוונות לעבר הסריג.
בעת המדידות אדם התבונן דרך הסריג ומדד את המרחק של כל צבע מדופן המנורה באמצעות הסרגל. לאחר מכן הזווית חושבה בעזרת טאנגנס של המרחק מהמרכז חלקי המרחק של הסריג מהמנורה והוצבה בנוסחה (9). אורכי הגל המרכיבים את האור הנפלט מהמנורה חולצו מהנוסחה ובעזרת אורכי גל אלו נמצא החומר ממנו מורכבת המנורה.

תכנון עיבוד נתונים:

עבור מדידת זווית, השגיאה מורכבת משגיאת מריחה ושגיאת רזולוציה ולכן³:

$$\Delta\theta = \sqrt{\Delta res^2 + \Delta spread^2} \quad (10)$$
 כאשר Δres , $\Delta spread$ מחושבים באמצעות נוסחה 3.3 בחוברת עיבוד נתונים. זו השגיאה במעלות, השגיאה ברדיאנים מחושבת על ידי הכפלת שגיאה זו ב $\frac{\pi}{180}$.
 שגיאת סינוס הזווית⁴:

$$d\sin(\theta) = \cos(\theta) d\theta \quad (11)$$
 השגיאה של זווית השבירה בהינתן זווית יציאה כאשר $N = 2$ תחושב בעזרת נוסחה (4)⁴:

$$d\beta = \sqrt{\left(\frac{d\alpha}{2}\right)^2 + \left(\frac{d\delta}{2}\right)^2} \quad (12)$$

חישוב השגיאה של n כאשר מחלצים אותה מנוסחה (3) הוא⁴:

$$dn = \sqrt{\left(\frac{\cos(\alpha)}{\sin(\beta)} d\alpha\right)^2 + \left(-\frac{\sin(\alpha) \cos(\beta)}{\sin(\beta)^2} d\beta\right)^2} \quad (13)$$

השגיאה של n כאשר מחלצים אותה מנוסחה (6) הינה⁴:

$$dn = \frac{(4(N-1)^2 - 1) \cos(\alpha_{min}) \sin(\alpha_{min})}{\sqrt{(4(N-1)^2 - 1) \cos(\alpha_{min})^2 + 1}} d\alpha_{min} \quad (14)$$

מחלצים את α_{min} מחישוב נקודת מינימום לפרבולה, $\alpha_{min} = -\frac{b}{2a}$ ולכן⁴:

³ נוסחה 2.19 בחוברת עיבוד נתונים

⁴ נוסחה 4.17 בחוברת עיבוד נתונים

$$d\alpha_{min} = \sqrt{\left(-\frac{db}{2a}\right)^2 + \left(\frac{b}{2a^2} da\right)^2} \quad (15)$$

שגיאת אורך הגל מנוסחה (9) הינה⁴:

$$d\lambda = \frac{\cos(\theta_n)}{n \cdot N^*} d\theta_n \quad (16)$$

שגיאת הזווית אשר חושבה כ $\theta_n = \tan\left(\frac{x}{l}\right)$ ⁴:

$$d\theta_n = \frac{\sqrt{\left(\frac{dx}{l}\right)^2 + \left(-\frac{x}{l^2} dl\right)^2}}{\cos\left(\frac{x}{l}\right)^2} \quad (17)$$

x חושב באמצעות חיבור של הרדיוס והמרחק מקצה המנורה ולכן שגיאתו⁴:

$$dx = \sqrt{dr^2 + ds^2} \quad (18)$$

s הוא המרחק מקצה המנורה והוא חושב באמצעות סרגל אך הייתה מריחה על הסרגל לכן שגיאתו תחושב באופן זהה לנוסחה (10).

השגיאות של r, l חושבו באמצעות נוסחה 3.3 בחוברת עיבוד הנתונים עם הרזולוציה של המכשירים שמדדו אותם.

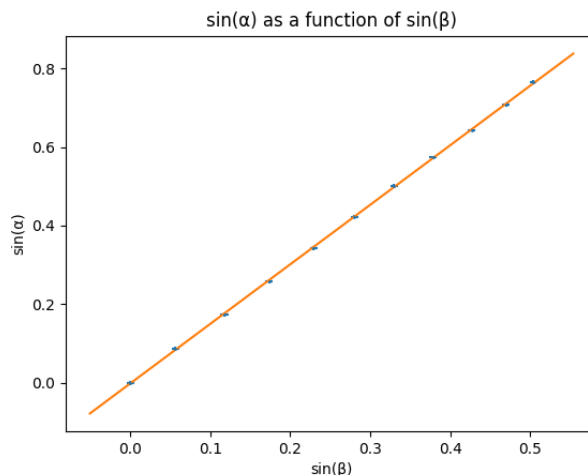
עיבוד תוצאות:

ההתאמה הראשונה היא התאמה לינארית בין $\sin(\alpha)$ ל $\sin(\beta)$:

$$y = a_0 + a_1 x \quad (19)$$

כאשר מצופה כי a_0 יהיה שווה לאפס.

לאורך המדידות ל α הייתה מריחה של מעלה ולזווית היציאה הייתה מריחה של מעלה וחצי.



איור 7 התאמה בין סינוס זווית הכניסה לסינוס זווית השבירה

הערכים שהתקבלו עבור ההתאמה באמצעות תוכנת אדינגטון:

$$a_0 = -2.2 \times 10^{-3} \pm 1.8 \times 10^{-3}$$

$$a_1 = 1.5171 \pm 5.5 \times 10^{-3}$$

התקבל ערך קרוב לאפס עבור a_0 כמצופה. השגיאה היחסית של a_1 :

$$\frac{\Delta a_1}{a_1} = 0.36\%$$

השגיאה היחסית נמוכה מה שמראה על דיוק מדידה גבוה. בגרף השארים יש התפזרות תוצאות סביב האפס בצורה אקראית דבר המראה על התאמה טובה. אולם, המדדים הסטטיסטיים הינם:

$$\chi_{red}^2 = 0.12$$

$$P - probability = 1.0$$

המדד χ_{red}^2 אמור להיות קרוב לאחד אך הוא יצא יחסית נמוך דבר שיכול להראות על שגיאות גבוהות מידי שכן בחישובו

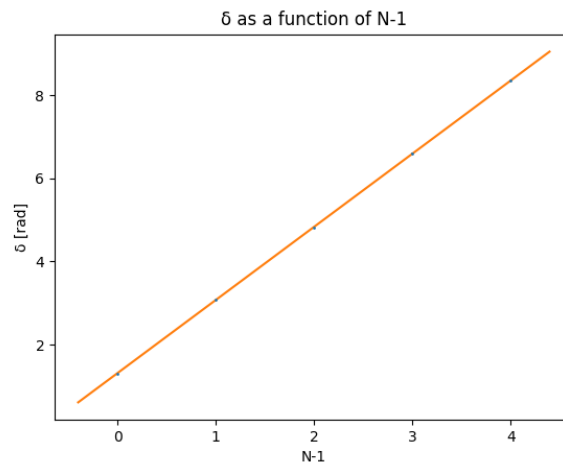
מחלקים בשגיאות. הטווח הרצוי עבור $P - probability$ גבוה מהטווח 0.05-0.95. דבר זה מצביע גם כן על כך שהערך χ_{red}^2 נמוך.

עבור התאמה זו התקבל:

$$n = 1.5171 \pm 5.5 \times 10^{-3}, \quad \frac{\Delta n}{n} = 0.36\%$$

נשווה תוצאה זו עם ההתאמות הבאות.

ההתאמה השנייה היא התאמה לינארית בין זווית היציאה ל $N-1$ לפי נוסחה (19) כאשר מצופה כי a_0 יהיה שווה α . המדידות בוצעו עבור זווית כניסה קבועה שהיא $\alpha = 1.31 \pm 0.32 \text{ rad}$, לזווית היציאה הייתה מריחה של 2 מעלות.



איור 8 זווית היציאה כפונקציה של $N-1$

הערכים שהתקבלו עבור ההתאמה באמצעות תוכנת אדינגטון:

$$a_0 = 1.3125 \pm 7.4 \times 10^{-3} \text{ rad}$$

$$a_1 = 1.7610 \pm 3.0 \times 10^{-3} \text{ rad}$$

התקבל ערך מאוד קרוב ל α עבור a_0 כמצופה. השגיאה היחסית של a_1 :

$$\frac{\Delta a_1}{a_1} = 0.17\%$$

השגיאה היחסית נמוכה מה שמראה על דיוק מדידה גבוה. בגרף השארים יש התפזרות תוצאות סביב האפס בצורה אקראית דבר המעיד על התאמה טובה. המדדים הסטטיסטים הינם:

$$\chi_{red}^2 = 0.82$$

$$P - probability = 0.48$$

המדד χ_{red}^2 קרוב לאחד ו $P - probability$ הינו בטווח הרצוי. דבר זה מצביע על התאמה טובה. עבור התאמה זו התקבל:

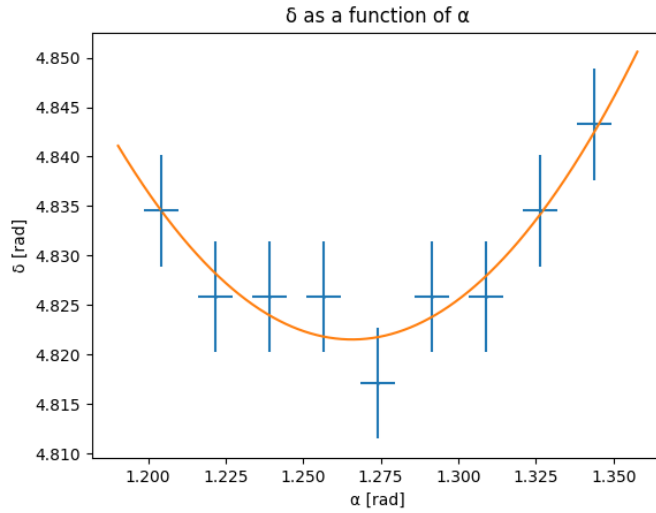
$$\beta = 0.6903 \pm 1.5 \times 10^{-3} \text{ rad}$$

$$n = 1.52 \pm 0.13, \quad \frac{\Delta n}{n} = 8.6\%$$

נשווה תוצאה זו עם ההתאמות הבאות.

התאמה 3 הינה התאמה פרבולית בין זווית היציאה δ לבין זווית הפגיעה α . עבור כל המדידות הייתה מריחה של מעלה גם בזווית הכניסה וגם בזווית היציאה:

$$y = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 \quad (20)$$



איור 9 גרף של זווית היציאה כפונקציה של זווית הכניסה

הערכים שהתקבלו עבור ההתאמה באמצעות תוכנת אדינגטון :

$$a_0 = 10.33 \pm 0.98$$

$$a_1 = -8.7 \pm 1.5$$

$$a_2 = 3.44 \pm 0.60$$

שגיאות יחסיות של הערכים :

$$\frac{\Delta a_0}{a_0} = 9.5\%$$

$$\frac{\Delta a_1}{a_1} = 18\%$$

$$\frac{\Delta a_2}{a_2} = 18\%$$

השגיאה היחסית גבוהה מה שמראה על דיוק מדידה נמוך. בגרף השארים יש התפזרות תוצאות סביב האפס בצורה אקראית דבר המעיד על התאמה טובה. המדדים הסטטיסטים הינם :

$$\chi_{red}^2 = 0.29$$

$$P - probability = 0.94$$

המדד χ_{red}^2 קטן מ-1 ו $P - probability$ הינו גבוה אך בטווח הרצוי. דבר זה יכול להצביע על שגיאות גבוהות מידי ועל התאמה לא טובה. עבור התאמה זו התקבל :

$$\alpha_{min} = 1.27 \pm 0.31 \text{ rad}$$

$$n = 1.53 \pm 0.35, \frac{\Delta n}{n} = 23\%$$

ניתן לראות כי השגיאה היחסית גבוהה מהמדידות הקודמות יורחב על כך בדיון ומסקנות.

הדרך הרביעית בה נמדד מקדם השבירה היא באמצעות משולש שווה צלעות. נמדד כי זווית הכניסה המקיימת את המשולש הינה :

$$\alpha = 0.8715 \pm 0.0056 \text{ rad}$$

ולכן יתקבל מקדם שבירה :

$$n = 1.5094 \pm 0.0074, \frac{\Delta n}{n} = 0.49\%$$

בחלק ב נמדדו אורכי גל של צבעים שונים עבור 2 מנורות. במנורה הראשונה נמדדו גם המקסימום מסדר ראשון וגם המקסימום מסדר שני.

θ	$\Delta\theta$	λ [nm]	$\Delta\lambda$ [nm]	$\frac{\Delta\lambda}{\lambda}$
0.2227	0.0040	387.5	6.9	1.8%
0.2560	0.0041	444.3	7.0	1.6%
0.3156	0.0043	544.5	7.1	1.3%
0.3262	0.0043	562.1	7.2	1.3%
0.3780	0.0045	647.4	7.4	1.1%

טבלה 1 מדידות עבור השיא הראשון של מנורה 1

θ	$\Delta\theta$	λ [nm]	$\Delta\lambda$ [nm]	$\frac{\Delta\lambda}{\lambda}$
0.4470	0.0049	379.2	3.9	1.0%
0.4753	0.0051	401.4	4.0	1.0%
0.6359	0.0073	521.0	5.2	1.0%
0.6435	0.0075	526.3	5.2	1.0%

טבלה 2 מדידות עבור השיא השני של מנורה 1

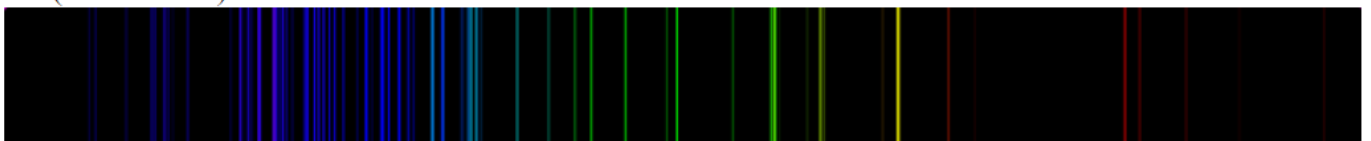
θ	$\Delta\theta$	λ [nm]	$\Delta\lambda$ [nm]	$\frac{\Delta\lambda}{\lambda}$
0.4470	0.0049	758.4	7.8	1.0%
0.3156	0.0043	544.5	7.1	1.3%
0.3262	0.0043	562.1	7.2	1.3%
0.3780	0.0045	647.4	7.4	1.1%

טבלה 3 מדידות עבור השיא הראשון של מנורה 2

כאשר משווים את אורכי הגל שהתקבלו בטבלה 1 לפליטת האור מאיור 10 ניתן לראות כי בטבלה התקבלו אורכי גל של צבע סגול, כחול, ירוק, צהוב, אדום ואלו הצבעים עם העוצמה החזקה ביותר באיור 10 ולכן הגז שהכי קרוב לתוצאות מהטבלה הוא קריפטון. בנוסף כאשר מסתכלים על איור 4 ניתן לראות כי צבע המנורה מאוד קרוב למנורת פליטת גז מקריפטון. במדידת השיא השני הצבע הצהוב והירוק שהתקבלו הם נמוכים ביחס לשיאם הראשון ולא היה ניתן לראות את האור האדום, דבר זה יורחב בדיון.

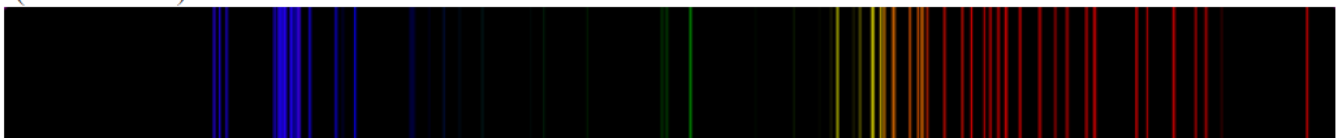
במנורת הגז השנייה יש שני אורכי גל אדומים, כאשר אורך הגל שמדדנו עבור אחד מהם הוא 758.4 ± 7.8 nm שזה ממש בקצה הטווח הנראה לכיוון האדום (עבור השגיאה השלילית). דבר זה מצביע על כך שכנראה מדובר במנורת גז ניאון שכן ניתן לראות באיור 11 שרוב פליטת האור שלה היא בטווח האדום ויש בה גם צהוב שהתקבל גם כן במדידות.

Krypton (36 electrons)



איור 10 פליטת גלי אור של קריפטון

Neon (10 electrons)



איור 11 פליטת גלי אור של ניאון

בחלק א בניסוי ניתן לראות שערכי מקדם השבירה שחולצו בכל המדידות קרובים זה לזה, דבר המאשש כי הערך חולץ נכונה בכל אחת מהמדידות.

הדרך הראשונה הייתה התאמה לינארית בין $\sin(\alpha)$ ל $\sin(\beta)$. התקבלו מדדים סטטיסטיים χ^2_{red} נמוך ו $P - probability$ גבוה. היות וערך מקדם השבירה שחולץ קרוב לשאר הערכים שנמדדו בניסוי ייתכן כי המדדים מעידים על הערכת שגיאות גדולה מידי וכי בניגוד למדדים ההתאמה טובה. בנוסף שגיאות פרמטרי ההתאמה קטנות מה שמעיד על דיוק מדידה. בהתאמה השנייה שהיא התאמה לינארית בין זווית היציאה ל $N-1$ התקבלו χ^2_{red} קרוב ל 1 ו $P - probability$ נמוך ובטווח המתאים לו. 2 המדדים מעידים על התאמה טובה מה גם שהן ערך β והן ערך n קרובים לשאר הערכים שנמדדו בניסוי, אולם ניתן לראות כי השגיאה היחסית של מקדם השבירה הינה מעל 5 אחוז. זוהי שגיאה גבוהה יותר מהשגיאה שהתקבלה בדרך הראשונה. ההתאמה שבוצעה בחלק זה בניסוי הייתה התאמה עם מספר קטן יותר של מדידות ולכן ייתכן שהפרמטרים שהתקבלו הם בעלי שגיאה גבוהה.

התאמה 3 הינה התאמה פרבולית בין זווית היציאה δ לבין זווית הפגיעה α . χ^2_{red} ו $P - probability$ שהתקבלו מעידים על התאמה לא טובה, שייתכן שגם כן נובעת משגיאות גדולות מידי שכן מקדם השבירה קרוב לשאר הערכים שנמדדו בניסוי, אך בעל שגיאה יחסית גבוהה מאוד. דבר נוסף שייתכן וגרם לשגיאה הגבוהה בדרך זו הוא שהתבצע קירוב לפונקציה בעזרת טור טיילור. קירוב זה נכון עבור סביבה קרובה למינימום אך מכיוון שלמד הזווית הייתה רזולוציה של 0.5 מעלות לא ניתן היה לבצע המון מדידות בסביבה קרובה מספיק לזווית המינימאלית.

בדרך הרביעית התקבל מקדם שבירה הקרוב לשאר הערכים שנמדדו והשגיאה נמוכה מאוד. למרות שהשגיאה נמוכה, שיטה זו אינה בהכרח הטובה ביותר שכן היא נסמכת על מדידה יחידה. כאשר מסתכלים על כל השיטות ניתן לראות כי הן הניבו תוצאות דומות מאוד אולם ישנן שיטות עם שגיאות גבוהות יותר או שיטות שמסתמכות על מדידות מעטות. לכן, כאשר רוצים למדוד את הערך של מקדם השבירה הדרך הכי טובה היא לבצע את כל המדידות בשיטות השונות ולקחת ממוצע.

עצות לשיפור:

- הרמת המשטח עליו מונח הלייזר שכן כך הקרן לא תצא מעל העדשה לאחר מספר מועט של החזרות פנימיות.
- שימוש בלייזר חזק יותר על מנת לראות יותר חזרות.
- שימוש בחדר חשוך יותר על מנת לזהות את הזוויות בצורה יותר מדויקת.

בחלק ב ייתכן כי הערכת השגיאות הייתה בחסר שכן אדם המתבונן דרך סריג עקיפה מדד לפי ראייתו את השנתה עליה הוא ראה שיא מסוים, כלומר צבע כלשהו. דבר זה מסביר למה בחלק מהצבעים קיבלנו אורכי גל שאינם תואמים את הצבע שהצופה ראה בעת שמדד את מרחקו ממרכז האלומה. בנוסף, ייתכן כי האדם מסתכל דרך הסריג בזווית מסוימת מה שיכול לגרום לעיוות התמונה ובכך למדידות לא מדויקות. המנורה היא צינור בעל רוחב מסויים ולכן האור היוצא ממנה אינו נקודתי, מה שיכול להשפיע על המרחקים שנמדדו שכן עבור המרחק שנמדד ממרכז המנורה צריך להתאים את מרכז האור דרך הסריג אך האור נמרח. עבור המנורה הראשונה נמדדו אורכי הגלים גם עבור השיא הראשון וגם עבור השיא השני. ניתן לראות כי עבור השיא השני התקבלו מדידות פחות איכותיות דבר זה נובע מכך שככל שהשיאים מתרחקים מהמרכז הם חלשים יותר מהשיאים הקרובים למרכז ולכן יותר קשה לאדם המסתכל דרך הסריג להבחין היכן האור וגם לא תמיד כל הצבעים שניתן היה לראות בשיא הראשון יופיעו בשיא השני אם היו יחסית חלשים בשיא הראשון כפי שקרה עם הצבע האדום. גורם נוסף שיכול להשפיע על התוצאות הוא יינון המנורות. ככל שהמנורות מתחממות יש אנרגיה גבוהה מספיק על מנת לשחרר אלקטרונים לרמות אנרגיה גבוהות יותר. כאשר האלקטרון יורד חזרה לרמת האנרגיה המקורית שלו הוא פולט פוטון, אורך הגל של הפוטון הוא למעשה הצבע אותו אנו רואים. דרך נוספת בה ניתן למדוד היא הדרך המוצגת באיור 6, הצבת עדשה ממרכזת כך שניתן יהיה לראות את פיזור האור על משטח המונח מאחורי הסריג. בדרך זו היה קשה להפריד את הצבעים השונים מכיוון שהללו היו מאוד קרובים אחד לשני ונמרחו על פני מספר גדול של שנתות הסרגל כפי שניתן לראות באיור 12. בנוסף, דרך זו מצריכה עדשה ממרכזת מה שמוסיף משתנים למדידה כגון מוקד העדשה ולכן הוחלט שלא להשתמש בשיטה זו.



איור 12 פיזור אור על מסך

עצות לשיפור:

- ניתן לשנות את אופן המדידה כך שבמקום שהאדם המסתכל דרך הסריג ינסה למצוא את השנתה המתאימה בסרגל הוא יצייר את הנקודה בה האור פגע ולאחר מכן למדוד את המרחק.
- להדליק את האור לסירוגין על מנת למנוע התחממות.

נתונים לאדינגטון:

$\sin(\beta)$	$d\sin(\beta)$	$\sin(\alpha)$	$d\sin(\alpha)$
0	0.004878	0	0.005633
0.056693	0.00487	0.087156	0.005612
0.117537	0.004845	0.173648	0.005547
0.173648	0.004804	0.258819	0.005441
0.2292	0.004748	0.34202	0.005293
0.279829	0.004683	0.422618	0.005105
0.329691	0.004606	0.5	0.004878
0.378649	0.004515	0.573576	0.004614
0.426569	0.004412	0.642788	0.004315
0.469472	0.004307	0.707107	0.003983
0.503774	0.004214	0.766044	0.003621

איור 13 נתונים של ההתאמה הראשונה

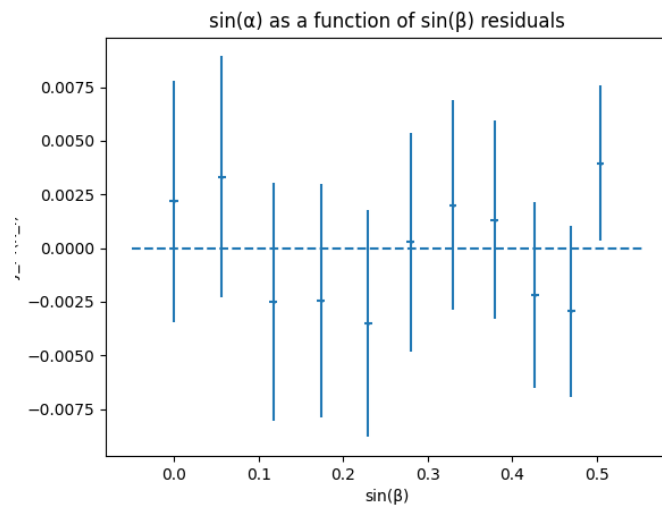
N	dN	δ [rad]	d δ
0	0.001	1.308997	0.010387
1	0.001	3.080506	0.010387
2	0.001	4.825835	0.010387
3	0.001	6.606071	0.010387
4	0.001	8.3514	0.010387

איור 14 נתונים של ההתאמה השנייה

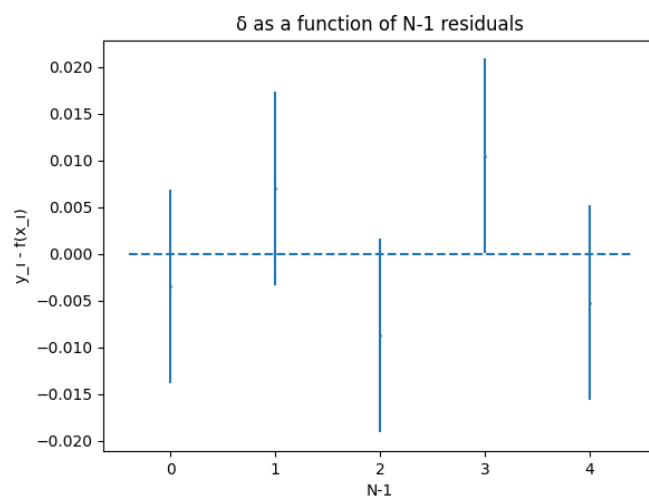
α [rad]	$d\alpha$ [rad]	δ [rad]	d δ
1.204277	0.005633	4.834562	0.005633
1.22173	0.005633	4.825835	0.005633
1.239184	0.005633	4.825835	0.005633
1.256637	0.005633	4.825835	0.005633
1.27409	0.005633	4.817109	0.005633
1.291544	0.005633	4.825835	0.005633
1.308997	0.005633	4.825835	0.005633
1.32645	0.005633	4.834562	0.005633
1.343904	0.005633	4.843289	0.005633

איור 15 נתונים של ההתאמה השלישית

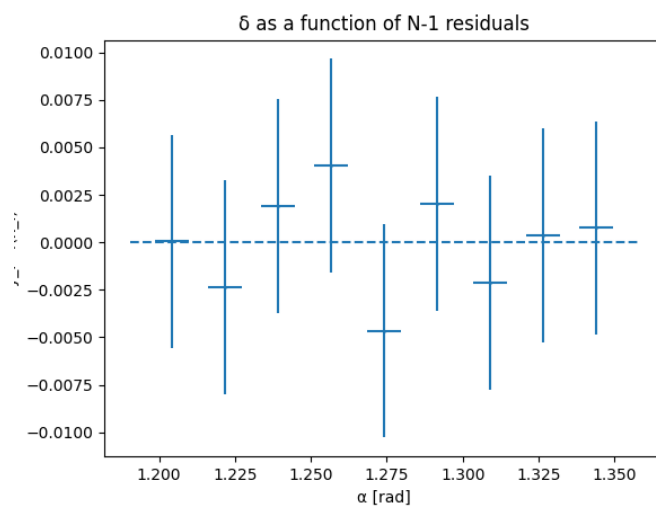
גרפי שארים:



איור 16 גרף שאררים של ההתאמה הראשונה

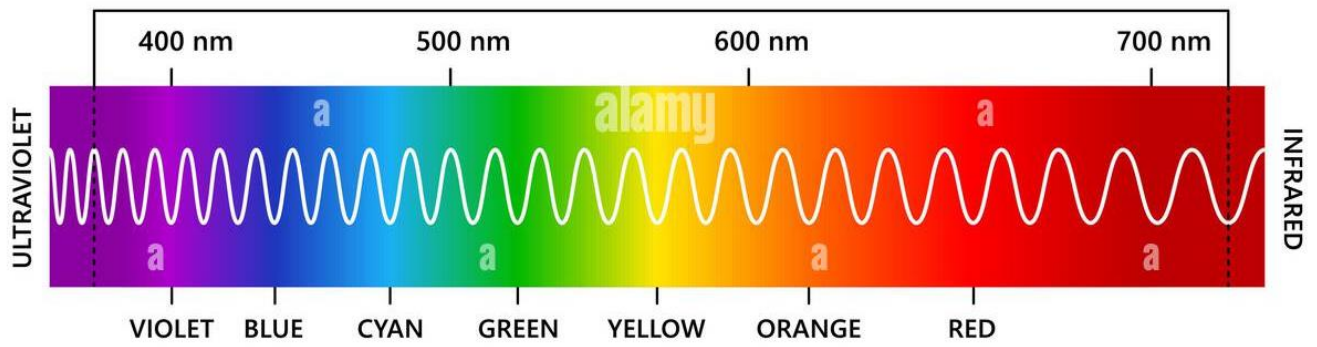


איור 17 גרף שאררים של ההתאמה השנייה



איור 18 גרף שאררים של ההתאמה השלישית

VISIBLE SPECTRUM



איור 19 ספקטרום האור הנראה



איור 20 מנורת פליטת גז קריפטון