

ספקטרוסקופיה

מילות מפתח:

ספקטרום, ספקטרוסקופ, עקיפה, התאבכות, סריג.

הציוד הדרוש: 3 מנורות ספקטרליות: Cd, He, Hg + ספקים, ספקטרומטר פריזמה, שריג, סרגל קשת ברדיוס של מטר, סרגל 1 מ', מוט לתפיסת הסריג, שנאי 6 וולט ושנאי 110 וולט.

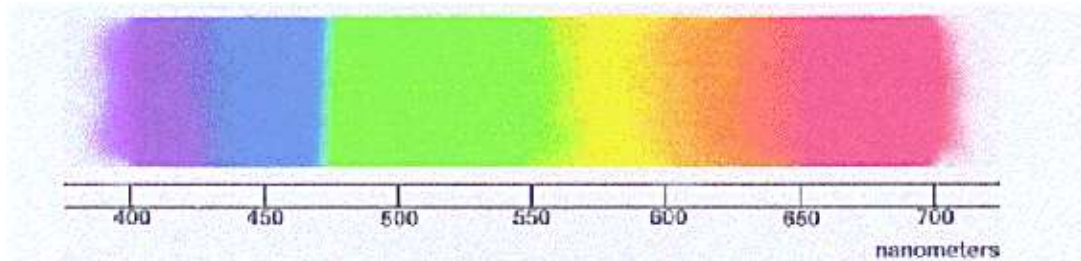
מטרות הנסוי:

- הכרת ספקטרוסקופ מנסרה למדידת אורכי גל בספקטרום הנראה.
- הכרת בספקטרוסקופ סריג למדידת אורכי גל בספקטרום הנראה.
- מדידות אורכי גל של קווים ספקטראליים מיסודות שונים.

1. תאוריה

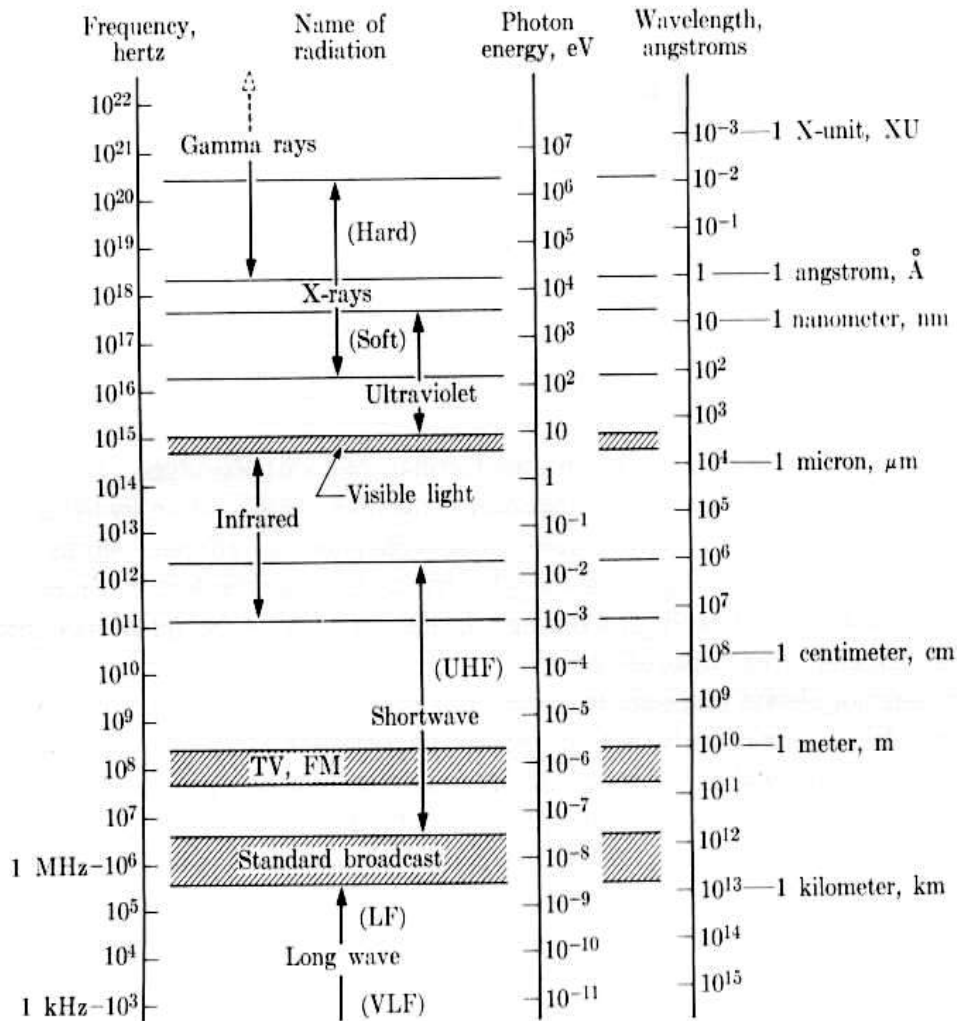
1.1 ספקטרום האור הנראה

האור הנראה הוא למעשה גל אלקטרומגנטי בתחום התדרים $3.9-7.7 \times 10^{14} \text{Hz}$ (תחום אורכי הגל $390\text{nm}-760\text{nm}$) שהעין רגישה להם, תחום זה נקרא "הספקטרום הנראה". אורכי גל שונים בספקטרום מתאפיינים בצבעים שונים כאשר האדום נמצא בקצה הספקטרום והוא בעל התדר הנמוך ביותר ($3.9 \times 10^{14} \text{Hz}$), ואילו הסגול בקצה בעל התדר הגבוה ביותר ($7.7 \times 10^{14} \text{Hz}$). באופן כללי, תחום התדרים של גלים אלקטרומגנטיים כולל תחומים נוספים כגון: אינפרא אדום- נמוך מתדר הצבע האדום, אולטרא סגול- מעל לצבע הסגול, גלי רדיו בתחום $30\text{Hz} - 6 \times 10^8 \text{Hz}$, או קרני X בתחום $3 \times 10^{15} \text{Hz} - 3 \times 10^{20} \text{Hz}$, ועוד.



איור 1: תחום הספקטרום של האור הנראה

-ספקטרוסקופיה-



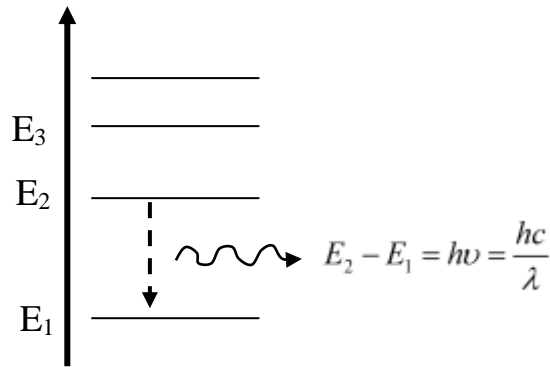
איור 2: הגלים אלקטרומגנטיים בתדרים שונים

לפי עיקרון הדואליות של הגלים, ניתן להתייחס אל האור כגל-אלקטרומגנטי או כאל שטף של "חלקיקים" הנקראים פוטונים. האנרגיה של פוטון פרופורציונית לתדר של הקרינה, קבוע הפרופורציה הוא קבוע פלנק h .

$$(1) \quad E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

על פי תורת הקוונטים, לכל אטום ומולקולה ישנם רמות אנרגיה (בדידות) בהן הוא יכול להימצא. מעבר בין רמת אנרגיה אחת לשניה מלווה בקליטת/פליטת פוטון, כאשר אנרגיית הפוטון שווה להפרש בין רמות האנרגיה.

-ספקטרוסקופיה-



איור 3: מעבר בין רמות אנרגיה מלווה בפליטת פוטון

כאשר מעוררים יסוד (ע"י חימום או מתח חשמלי), יכולים האלקטרונים ביסוד לעבור לרמת אנרגיה גבוהה, ולאחר זמן מסויים (זמן החיים של הרמה) יורד האלקטרון בחזרה לרמה נמוכה יותר תוך כדי פליטת פוטון המתאים להפרש בין הרמות (ראו איור 3). ספקטרום אורכי הגל של הפוטונים הנפלטים מיסוד מסוים משמש כטביעת האצבעות של היסוד.

בניסוי זה נשתמש במנורות כספית, הליום וקדמיום. קווי ספקטרום בולטים

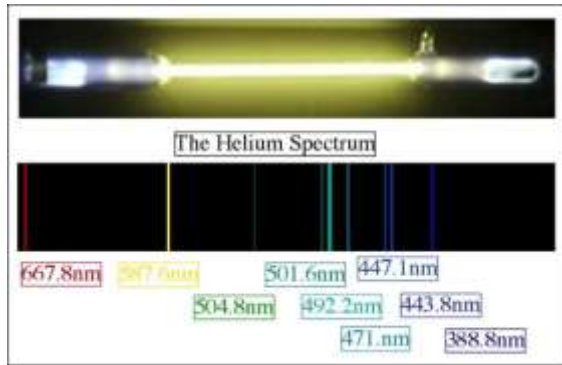
של מנורת הכספית והליום וקדמיום בתחום הנראה, נתונים בטבלאות I, II ו-III.

צבע	אורך גל ב- nm
כתום	579.0
צהוב	577.0
ירוק	546.1
ירוק כחלחל	491.6
כחול	435.8
סגול (חלש)	407.8
סגול (חזק)	404.7



טבלה I: חלק מקווי ספקטרום של מנורת כספית בתחום הנראה

-ספקטרוסקופיה-



אורך גל ב nm	צבע
706.6	אדום (חלש)
667.8	אדום (חזק)
587.6	צהוב
504.8	ירוק חלש
501.6	ירוק חזק
447.2	כחול כהה
388.8	סגול

טבלה II: חלק מקווי ספקטרום של מנורת הליום בתחום הנראה

אורך גל ב nm	צבע
643.8	אדום (חזק)
635.9	אדום
508.5	ירוק
480	כחול
467.8	כחול חלש
441.4	כחול סגלגל

טבלה III: חלק מקווי ספקטרום של מנורת קדמיום בתחום הנראה

לגילוי אורכי הגל הנפלטים נשתמש בספקטרוסקופ מנסרה וספקטרוסקופ סריג ונמדוד את אורכי הגל האופייניים לכל יסוד.

- הדגמה ביוטיוב <https://www.youtube.com/watch?v=oae5fa-f0S0>

1.2 התאבכות

כאשר שני גלים מגיעים לאותו מקום באותו הזמן, כל אחד מהגלים תורם את חלקו לגל הסופי המתקבל. כל גל הוא הפרעה המתקדמת במרחב, וכשיש יותר מגל אחד, ההפרעה הסופית היא חיבור של שני הגלים באותו המקום באותו הרגע.

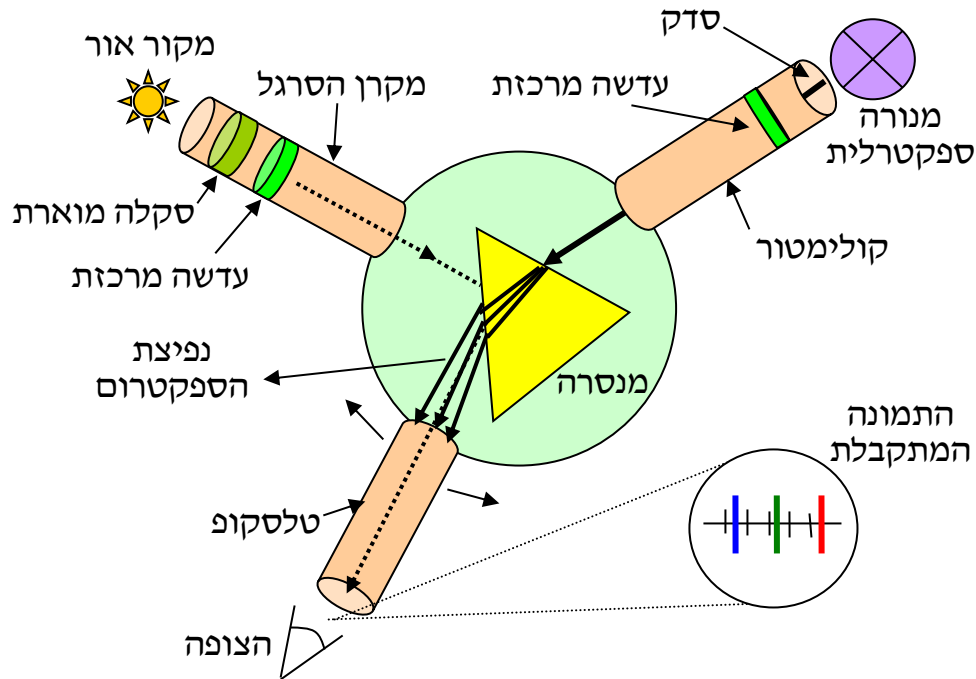
התאבכות בונה מתרחשת כאשר הגל הסופי גדול משני הגלים שיצרו אותו, שני הגלים תורמים זה לזה.

התאבכות הורסת מתרחשת כאשר הגל הסופי שמתקבל מחיבור שני הגלים קטן, ואף יכול להתבטל, מכיוון ששני הגלים בדיוק מקוזזים זה את זה.

- [סרטון](#) מעולה על התופעה וניסוי יאנג ביוטיוב.

1.3 ספקטרוסקופ מנסרה

מקדם השבירה של זכוכית תלוי באורך הגל של הקרינה, לכן זווית ההסחה במנסרה תהיה שונה עבור אורכי גל שונים. תיאור סכמתי של המערכת מופיע בציור 4.



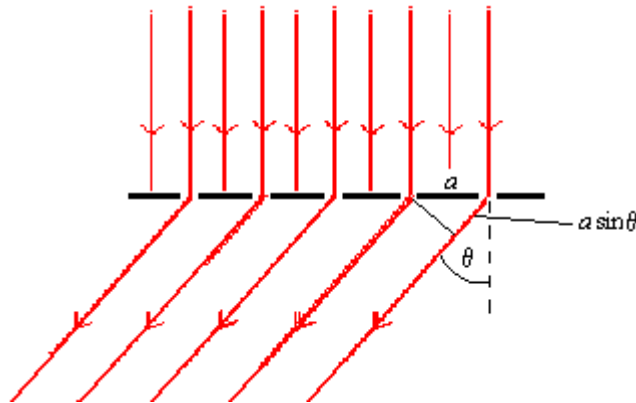
איור 4 : ספקטרוסקופ מנסרה

המערכת מכילה : מנסרה, שפופרת קולימטור שתפקידה לייצר אלומת קרניים מקבילות מהמנורה הספקטרלית אל המנסרה, מקרון הסרגל תפקידו להקרין סקלה עם שנתות מוארות על גבי פיאת המנסרה, והטלסקופ באמצעותו נצפה במיקוד בקרני האור המגיעים מהמנסרה.

המנורה הנבדקת מאירה לתוך סדק הקולימטור הנמצא במישור המוקד של עדשה מרכזת, ולכן האור ימשיך כאלומת קרניים מקבילות לתוך המנסרה. במנסרה מתרחשת נפיצה של האור, גלים באורכי גל שונים יוסחו בזווית שונה וכך נקבל את תמונת הסדק בצבעי הספקטרום השונים. נצפה בספקטרום באמצעות הטלסקופ. הסרגל המואר מוקרן על פיאת המנסרה ותמונתו מוחזרת לכוון הטלסקופ כך שניתן להתאים לכל קו ספקטרלי ערך מספרי מהסקלה המוארת. התמונה המתקבלת היא של סרגל מואר ועליו יופיעו במספר מקומות דמויות של הסדק בצבעים שונים.

1.4 ספקטרוסקופ סריג

הסריג שנעבוד איתו הוא מבנה מחזורי של הרבה סדקים מקבילים במישור. נסמן ב- a את המרחק בין מרכזי סדקים שכנים. כדי להבין את עקרון פעולתו של סריג נתאר לעצמנו אלומת קרניים מקבילות באורך גל λ הפוגעת בניצב למישור הסריג (ראו איור 5). לפי עקרון הויגנס כל נקודה על הסדק המואר מהווה מקור אור בפני עצמו. אם כן, סדק צר מתנהג כמקור אור המקרין לכל הכיוונים במישור הדיף. הקרניים המקבילות הפוגעות בסריג נפלטות מאותו אטום של המקור ובאותו הזמן, ולכן שני סדקים שכנים פועלים כשני מקורות אור קוהרנטיים שהם בעלי אותה תדירות והפרש הפאזה ביניהם נשאר קבוע בזמן.



איור 5: קרניים העוברות דרך סדקים סמוכים

נסתכל בציור 5 על קרניים של סדקים שכנים העוזבות את הסריג בזווית θ . התנאי לכך שהקרניים של מערכת הסדקים יתנו התאבכות בונה הוא שהפרש הדרכים האופטיות של קרניים שכנות יהיה כפולה שלמה של אורך הגל. ניתן לראות שהקרן הימנית עושה דרך אופטית שארוכה ב- $a \sin \theta$ מהדרך של הקרן השכנה. ע"י דרישה שדרך זאת תהיה שווה לכפולה שלמה של אורך הגל נקבל את המשוואה הבאה:

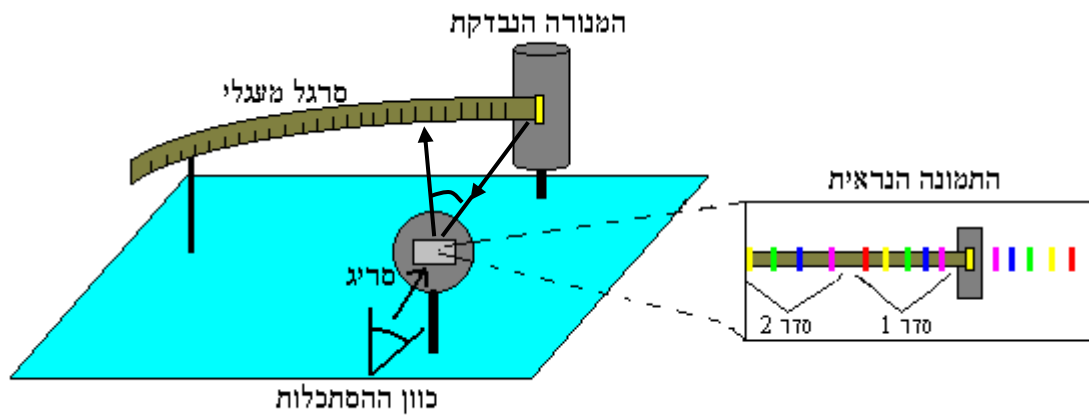
$$(2) \quad \sin \theta = \frac{n\lambda}{a}$$

כאשר $n = 1, 2, 3, \dots$ הוא מספר טבעי הנקרא סדר ההתאבכות. אנו נצפה ישירות במקור האור דרך הסריג ונראה דמויות (מדומות) שלו בצבעים שונים בזוויות שונות. הדמות מסדר האפס (עבור $n = 0$) מתקבלת לכל אורכי הגל בזווית $\theta = 0$. במקרה זה אנו רואים את הדמות הטבעית של מקור האור. בסדרים הגבוהים יותר נבחין בהפרדה של הצבעים השונים כאשר הספקטרום האופיני למנורה חוזר על עצמו בכל

-ספקטרוסקופיה-

סדר מסדרי ההתאבכות. ככל שנצפה בסדר גבוה יותר ההפרדה תהיה טובה יותר בין אורכי גל שכנים.

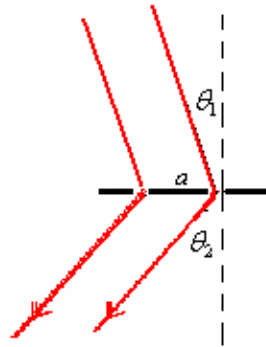
מערכת המדידה מורכבת ממנורה, סריג וסרגל מעגלי ברדיוס 1 מטר כמתואר באיור 6. הסריג נמצא במרכז המעגל ואילו המנורה והסרגל נמצאים על היקף המעגל. הסריג מכוון כך שפגיעת הקרניים המגיעות מהמנורה תהיה בניצב למישור הסריג.



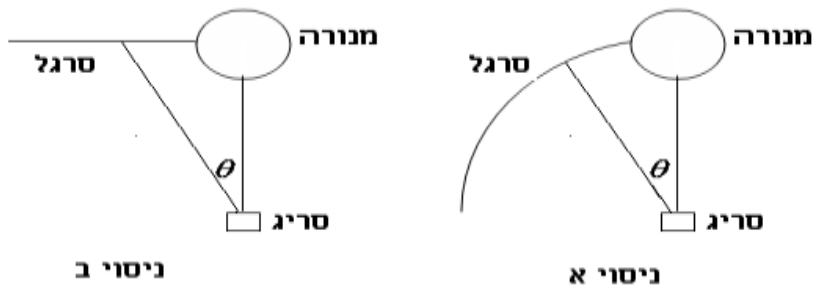
איור 6 : ספקטרומטר סריג.

1.5 עבודת הכנה

1. הסבר מדוע בספקטרוסקופ מנסרה צריך לדעת קודם את קווי ספקטרום של לפחות אחת מהמנורות שבהם אנחנו משתמשים.
2. שימוש בספקטרוסקופיה הינו נפוץ באסטרונומיה. חשבו מה ניתן ללמוד ע"י חקירת הספקטרום של עצמים שונים בחלל.
3. כאשר משתמשים בספקטרוסקופ סריג מה צריך להיות המרחק בין הסדקים בסריג כדי לראות את הסדר הראשון אך לא את הסדר השני.
4. נוסחה (2) הינה נכונה רק כאשר הקרניים פוגעות בניצב לסריג.
- א. מצא נוסחה כללית שמתארת פגיעה בסריג בזווית θ_1 . (רמז: הסתכלו על ציור הבא וחישבו מהו ההפרש בין הדרכים האופטיות של הקרניים).



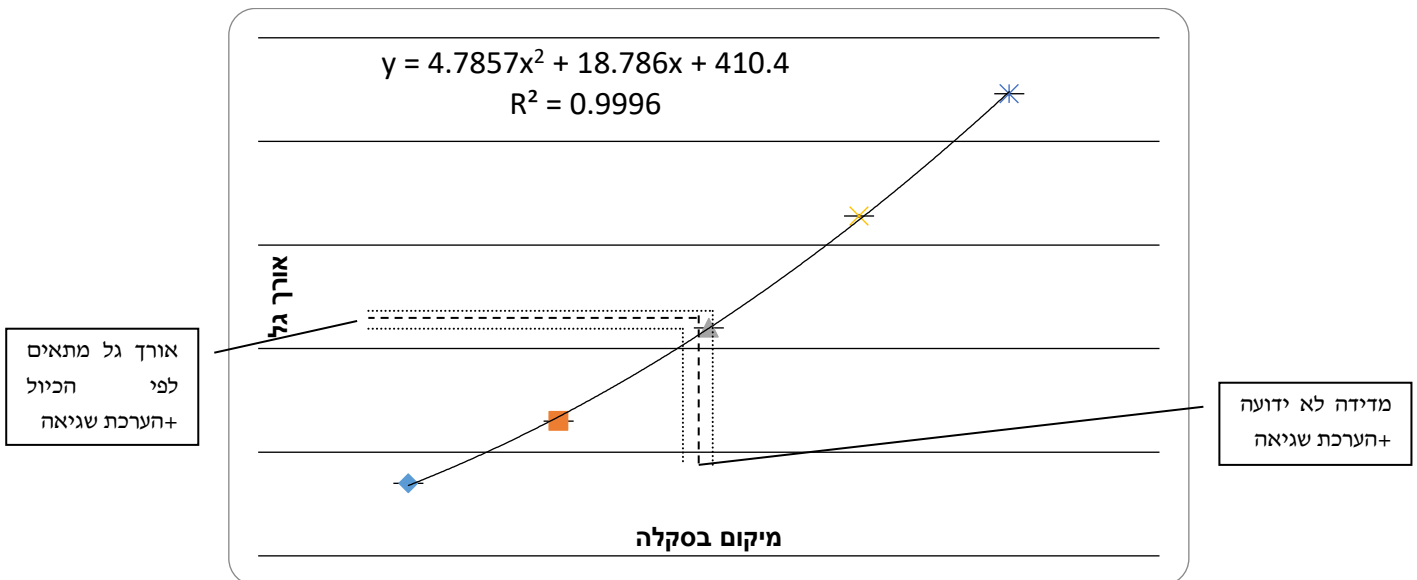
- ודא שכאשר $\theta_1 = 0$ הנוסחה תהיה זהה לנוסחה (2).
- ב. במידה ופגיעת הקרניים אינה בניצב לסריג, האם הזווית שבה נראה את קו הצבע תגדל או תקטן.
- ג. עבור $n=1$, זוויות $\theta_1 = \theta_2 = 30^\circ$ וגל בצבע אדום מצא את המרחק בין כל שני סדקים שכנים בסריג.
5. בניסוי במעבדה שלנו משתמשים בסרגל מעגלי, איך מחשבים את הזווית θ ?
 כעת משתמשים בסרגל ישר, איך ניתן לחשב את הזווית θ ?



2. מהלך הניסוי

2.1 ספקטרוסקופ מנסרה

- כווננו את סדק הקולימטור אל מנורת הכספית ותצפו בקווי הספקטרום. תקטינו את רוחב הסדק עד אשר כל צבע נראה כקו דק. תזהו את הקווים ותקבעו את מקומם בסקלה. העריכו את השגיאה במיקום הקווים.
- על בסיס הנתונים שרשמתם, תערכו גרף כיול של אורך הגל כתלות בקריאת הסקלה. הוסיפו לכל נקודה בגרף את הצלב המתאר את השגיאה בכל מדידה.
- התאימו לנתונים פונקציה מסוג פולינום מסדר שני $(y = ax^2 + bx + c)$. הפונקציה המתקבלת הינה אמפירית ונקראת עקומת הנפיצה של הספקטרוסקופ, לפיה אפשר למצוא את אורך הגל של קווי ספקטרום לפי מקומם בסקלה (איור 7).



איור 7 : עקומת נפיצה עם הערכת שגיאה.

- כדי למצוא את אורכי הגל של אור הנפלט ממנורת הליום, כווננו את סדק הקולימטור אל מנורת ההליום, ורישמו את מקומם של קווי הספקטרום אשר ניתן להבחין בהם. תמצאו את אורכי הגל של קווים אלו בעזרת עקומת הנפיצה. העריכו את השגיאה באורכי הגל והשוו את התוצאות עם ספקטרום ההליום.
- תחליפו את המנורה לקדמיום ותמצאו באמצעות עקומת הכיול את אורכי הגל הנראים ממנורה זו.

2.2 ספקטרוסקופ סריג

- נתון לכם סרגל מעגלי עליו רשום הרדיוס. הרכיבו את המערכת כך שפתח מנורת ההליום נמצא בקריאה 0 של הסרגל, תקבעו את הסריג במרחק של רדיוס מהמנורה, כווננו את הסרגל כך שימצא על היקף מעגל ברדיוס הנתון שהסריג במרכזו.
- תצפו דרך הסריג לעבר מנורת ההליום באופן שתבחינו בעוצמה מקסימלית של המקור. באופן זה תוכל להיות בטוח שפוגע אור בעוצמה מספקת בסריג.
- תקבעו את מקומם של קווי הספקטרום שהנכם רואים על גבי סרגל המונח ממול, הבחינו בקווי הסדר ראשון ($n = 1$), הסדר השני ($n = 2$) והשלישי.
- שימו לב: מדוע בסדר השני לא מופיע קו אדום ובמקומו מופיע קו סגול-ורוד? רמז: בסדר השלישי לא מופיע קו כחול...
- תחשבו את הזווית θ של הקווים השונים. $\theta [rad] = L/R$. מיקום על הסרגל, R – רדיוס.
- תערכו גרף של $\sin\theta$ כנגד אורכי הגל λ (הנתונים לך בטבלה II) עבור כל סדר בנפרד, ותמצאו מתוך הגרף את a .
- רישמו היכן על הסקלה הייתם מצפים לקבל את הקווים שמופיעים באיור של מנורת הליום, אך לא בטבלה II. תסבירו מדוע לא ניתן להבחין בקווים אלה בניסוי.
- תחליפו את מנורת ההליום במנורת קדמיום ותמצאו את אורכי הגל הנפלטים ממנורה זו. תשתמשו בקבוע הסריג שחושב קודם.
- לסיכום יש להשוות את רוחב קו הסריג a שהתקבל מתוך הגרפים למאפיין הסריג. מאפיין הסריג שבניסוי הינו 300 קווים למילימטר.

2.3 בחינת ספקטרום של מנורה באמצעות מצלמה ספקטראלית

בחלק זה של הניסוי נבחן את הספקטרום של המנורות הספקטראליות באמצעות מצלמה ספקטראלית (איור 8) והתוכנה Rspec explorer. המצלמה פועלת על עיקרון ספקטרוסקופ סריג שהשתמשתם בניסוי הקודם, אך הפעם קרני האור פוגעים בחיישן CCD של המצלמה ולא בעין האנושית כמו שהיה בניסוי הקודם. האור עובר דרך סריג פנימי עם מספר קווים ידוע ולאחר מכן פוגע בחיישן המצלמה שממיר אותו לפיקסלים ומתקבלת תמונה על מסך המחשב. האור שפוגע בסריג המצלמה עובר נפיצה לקווים ספקטראליים בדידים בצבעים שונים. תוכנת מחשב מעבדת את התמונה שמתקבלת מהמצלמה ומתאימה את אורכי הגל לצבעים שמופיעים בתמונה

-ספקטרוסקופיה-

לפי הכיול שבוצע ע"י היצרן. מתחת לכל קו ספקטראלי שיופיע על המסך ניתן לראות את אורך הגל שלו ביחידות nm.



איור 8 : מצלמה ספקטראלית

בעת ביצוע הניסוי כדאי להחשיך את החדר ולמנוע מקורות אור נוספים.

- הפעילו את המחשב

- תפתחו את תוכנת "Rspec Explorer" (Rspec Explor) במחשב. ממשק המשתמש מופיע באיור 9.



The screenshot shows the Rspec Explorer software interface. On the left, a camera view shows a spectrum with several vertical lines. On the right, a 'Profile' graph shows intensity versus wavelength in nanometers. The interface includes a menu bar (File, Edit, View, Tools, Help), a toolbar, and a control panel at the bottom with buttons for 'Open', 'Record', 'Pause', 'Stop', and 'Setup'.

Annotations in speech bubbles:

- שמירת תמונת הספקטרום :
File → Export profile image as JPG
- שמירת הגרף ללוח
- הצגת קווי רפרנס של יסודות שונים על גבי הגרף
- תחום הניתוח
- האור של המקור
- הפירוק הספקטראלי
- לכידת תמונה ממצלמה
- בחירת המצלמה

-ספקטרוסקופיה-

איור 9: ממשק המשתמש של תוכנת Rspec explorer המקשרת בין המחשב למצלמה ספקטרלית. הממשק של התוכנה מתחלק לשני חלקים. בחלק השמאלי מופיעה תמונה של מה שרואה המצלמה בזמן אמת, בחלק הימני מופיע החלון Profile בו ניתן לנתח את הקווים הספקטראליים של האור שרואה המצלמה.

- הדליקו את מנורת ההליום
- הציבו את המצלמה במרחק מסוים מהמנורה בזווית שתבחין בעוצמה המקסימאלית של המקור. באופן זה תוכלו להיות בטוח שהאור פוגע בעוצמה מספקת בסריג של המצלמה וניתן להבחין ברוב קווי הספקטרום של המנורה (בתחום הנראה).
- כווננו את המצלמה כך שהאור של המקור יהיה בצד השמאלי של חלון המצלמה, והקו הצהוב של 0 ננומטר יפול במרכז הפיק האדום בחלון ה-Profile כמו שמופיע באיור 9.
- התוכנה תנתח רק את התחום שנמצא בין שני הקווים המקבילים בחלון המצלמה. לכן הזיזו עם העכבר את שני הקווים המקבילים האופקיים לאמצע של הקווים הספקטראליים כמו שמופיע באיור 9.
- סיימתם לכוון את המצלמה וכעת ניתן למדוד את אורכי הגל של הקווים הספקטראליים בחלון ה-Profile.
- בחלון ה-Profile תעברו עם העכבר על כל פיק שנמצא באזור הצבעוני ורישמו במחברתך את אורכי הגל המדוייקים של כל הקווים הספקטראליים של מנורת ההליום. (ניתן להגדיל את הגרף עם הגלגלת של העכבר, לחיצה כפולה תחזיר את הזום לברירת המחדל).
- השוו את הערכים שהתקבלו בתוכנה עם הערכים התאורטיים המופיעים בתדריך והסיקו מסקנות.
- תשמרו את תמונת המצלמה  וגרף ה-Profile (File→Export profile image as JPG) וצרפו אותם לדו"ח. לאחר השמירה התמונות יופיע בתיקית RspecCapture שנמצאת על שולחן העבודה.
- באופן זה תקבעו את אורכי הגל של הקווים הספקטראליים של מנורות **קדמיום וכספית**, השוו את הערכים שהתקבלו בתוכנה עם הערכים שהתקבלו בספקטרוסקופ המנסרה וספקטרוסקופ הסריג והסיקו מסקנות.
- בסיום הניסוי תכבו את המחשב, העבירו את מפסקי המנורות למצב OFF וסדרו את העמדה.