

## ספקטרוסקופיה

### **מילות מפתח:**

ספקטרום, ספקטרוסקופ, עקיפה, התאבכות, סריג.

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

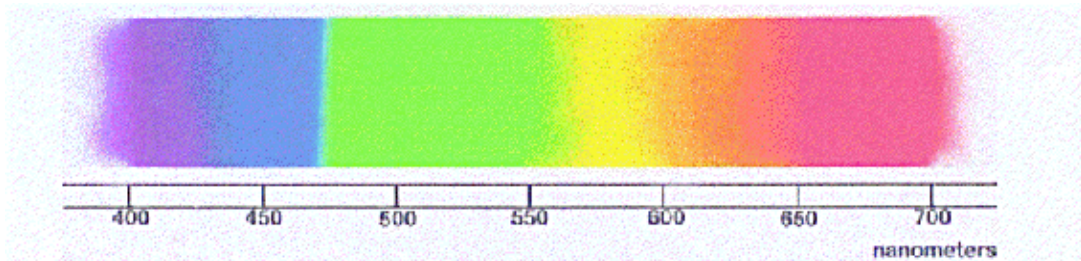
### **מטרות הנסוי:**

- 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. תיאוריה

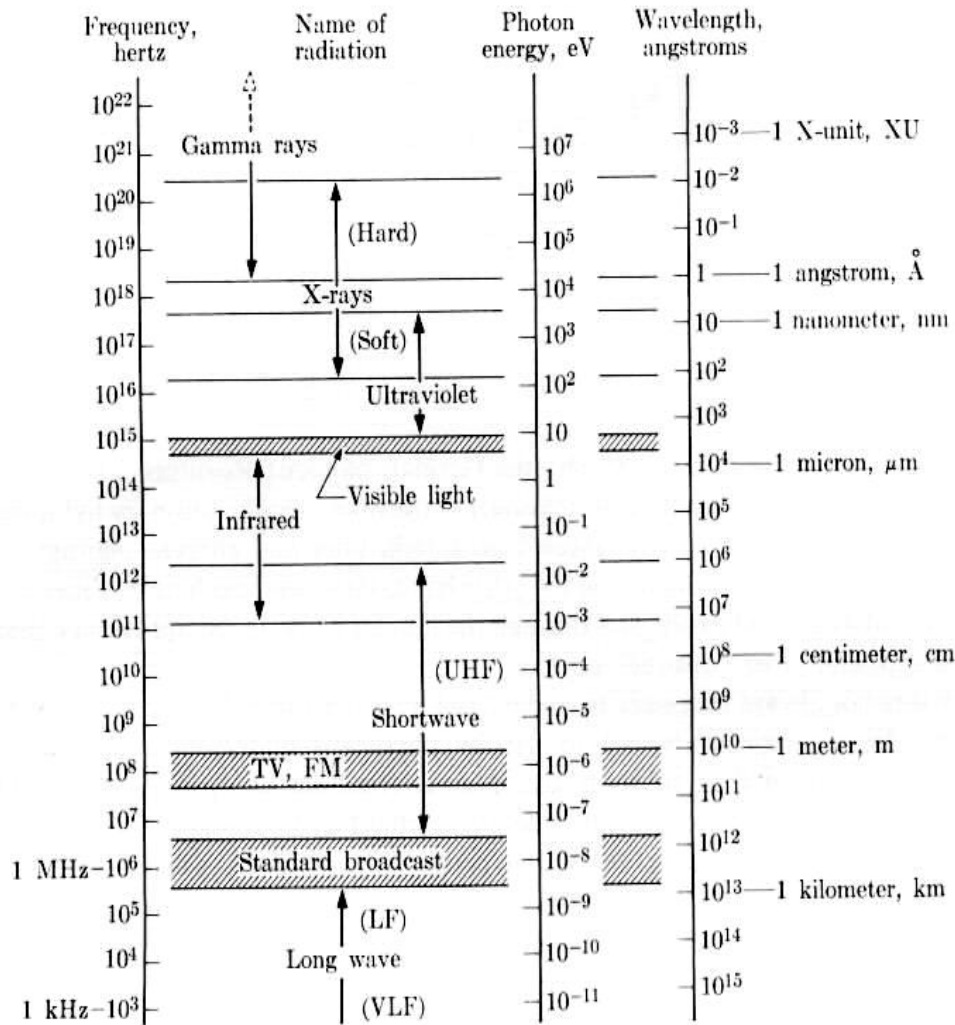
### 1.1 ספקטרום האור הנראה

האור הנראה הוא למעשה גל אלקטרומגנטי בתחום התדרים  $3.9-7.7 \times 10^{14} \text{ Hz}$  (תחום אורכי הגל 390nm-760nm) 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-**



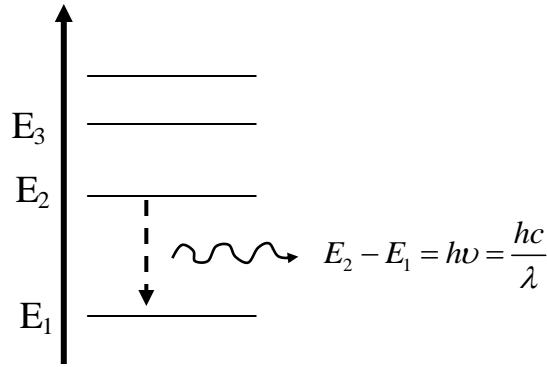
**איור 2:** הגלים אלקטרומגנטיים בתדרים שונים

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 (ראה איור 3). ספקטרום אורכי הגל של הפוטונים הנפלטים מיסוד מסוים משמש כטביעת האצבעות של היסוד.

בניסוי זה נשתמש במנורות כספית, הליום ונתרן וקדמיום. קווי ספקטרום בולטים של מנורת הכספית והליום בתחום הנראה, נתונים בטבלאות I ו-II.

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

**טבלה I:** חלק מקווי ספקטרום של מנורת כספית בתחום הנראה

צבע	אורך גל ב nm
אדום (חלש)	706.6
אדום (חזק)	667.8
צהוב	587.6
ירוק חלש	504.8
ירוק חזק	501.6

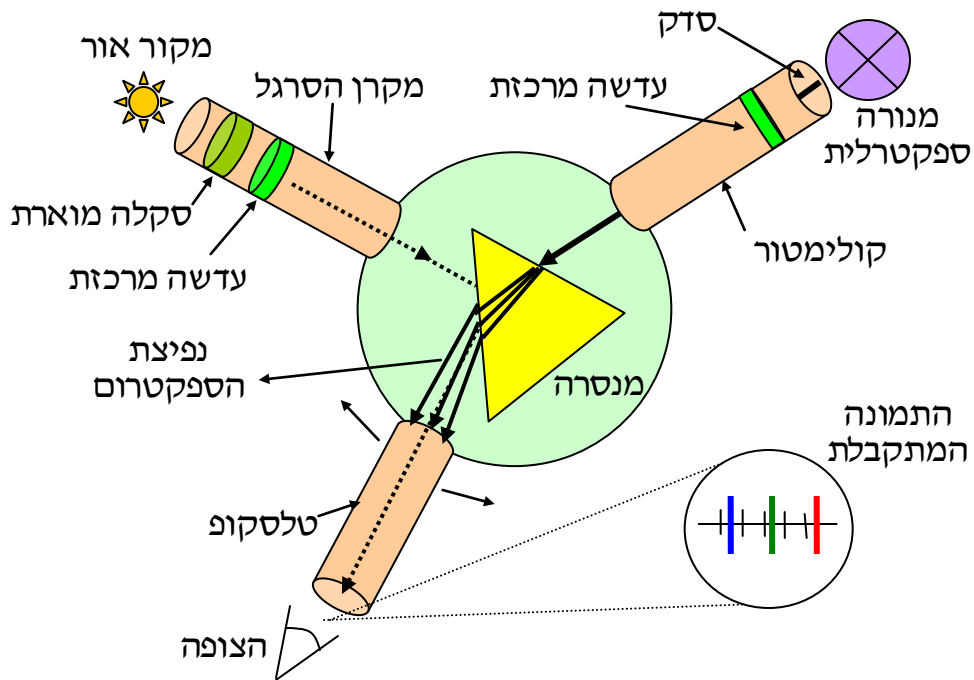
**טבלה II:** חלק מקווי ספקטרום של מנורת הליום בתחום הנראה

## -ספקטרוסקופיה-

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

### 1.2 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 באיור .4



ציור 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.

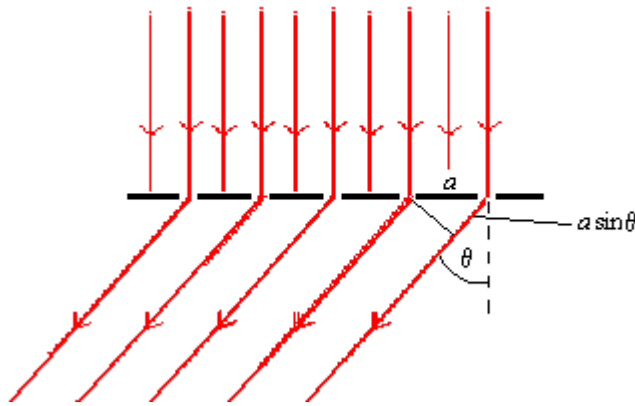
המנורה הנבדקת מאירה לתוך סדק הקולימטור הנמצא במישור המוקד של עדשה מרכזת, ולכן האור ימשיך כאלומת קרניים מקבילות לתוך המנסרה. במנסרה מתרחשת נפיצה של האור, גלים באורכי גל שונים יוסחו בזווית שונה וכך נקבל את תמונת הסדק בצבעי הספקטרום השונים. נצפה בספקטרום באמצעות הטלסקופ. הסרגל המואר מוקרן על פיאת המנסרה ותמונתו מוחזרת לכוון הטלסקופ כך שניתן

## -ספקטרוסקופיה-

להתאים לכל קו ספקטרלי ערך מספרי מהסקלה המוארת. התמונה המתקבלת היא של סרגל מואר ועליו יופיעו במספר מקומות דמויות של הסדק בצבעים שונים.

### 1.3 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  $\lambda$  הפוגעת בניצב למישור הסריג (ראה ציור 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.



ציור 5: קרניים העוברות דרך סדקים סמוכים

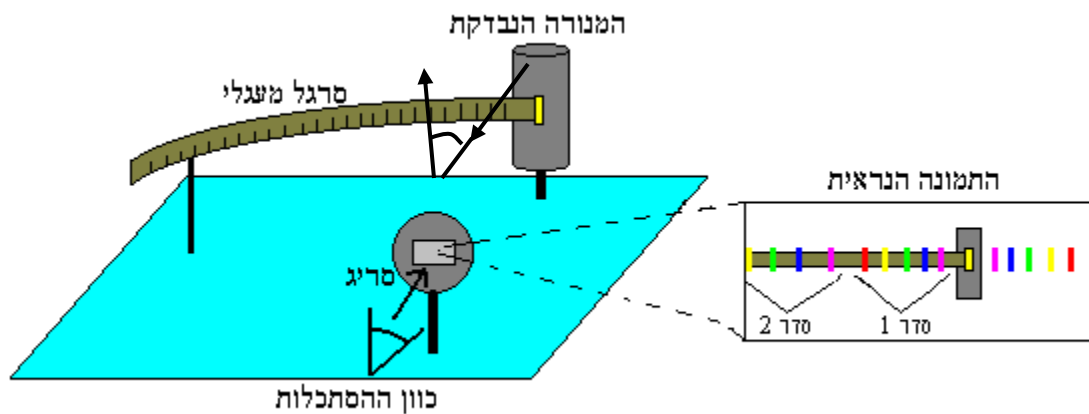
נסתכל בציור 5 על קרניים של סדקים שכנים העוזבות את הסריג בזווית  $\theta$ . התנאי לכך שהקרניים של מערכת הסדקים יתנו התאבכות בונה הוא שהפרש הדרכים האופטיות של קרניים שכנות יהיה כפולה שלמה של אורך הגל. ניתן לראות שהקרון הימנית עושה דרך אופטית שארוכה ב- $a \sin \theta$  מהדרך של הקרון השכנה. ע"י דרישה שדרך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

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

## -ספקטרוסקופיה-

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 האופייני למנורה חוזר על עצמו בכל סדר מסדרי ההתאבכות. ככל שנצפה בסדר גבוה יותר ההפרדה תהיה טובה יותר בין אורכי גל שכנים.

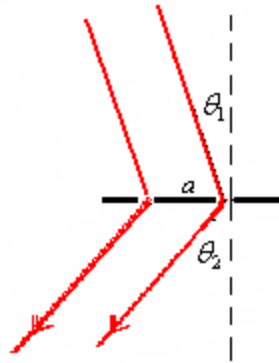
מערכת המדידה מורכבת ממנורה, סריג וסרגל מעגלי ברדיוס 1 מטר כמתואר באיור 6. הסריג נמצא במרכז המעגל ואילו המנורה והסרגל נמצאים על היקף המעגל. הסריג מכוון כך שפגיעת הקרניים המגיעות מהמנורה תהיה בניצב למישור הסריג.



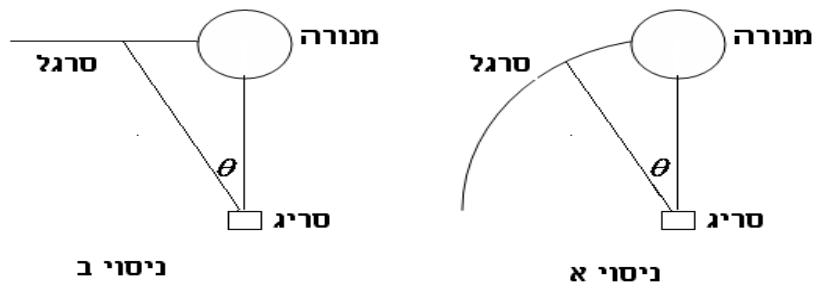
איור 6: ספקטרומטר סריג.

**1.4. עבודת הכנה**

2. הסבר מדוע בספקטרוסקופ מנסרה צריך לדעת קודם את קווי ספקטרום של לפחות אחת מהמנורות שבהם אנחנו משתמשים.
3. שימוש בספקטרוסקופיה הינו נפוץ באסטרונומיה. חשבו מה ניתן ללמוד ע"י חקירת הספקטרום של עצמים שונים בחלל.
4. כאשר משתמשים בספקטרוסקופ סריג מה צריך להיות המרחק בין הסדקים בסריג כדי שנוכל לראות את הסדר הראשון אך לא את הסדר השני.
5. במידה ופגיעת הקרניים אינה בניצב לסריג, האם הזווית שבה נראה את קו הצבע תגדל או תקטן.
6. נוסחה (2) הינה נכונה רק כאשר הקרניים פוגעות בניצב לסריג. מצא נוסחה כללית שמתארת פגיעה בסריג בזווית  $\theta_1$ . (רמז: הסתכלו על ציור הבא וחישובו מהו ההפרש בין הדרכים האופטיות של הקרניים).



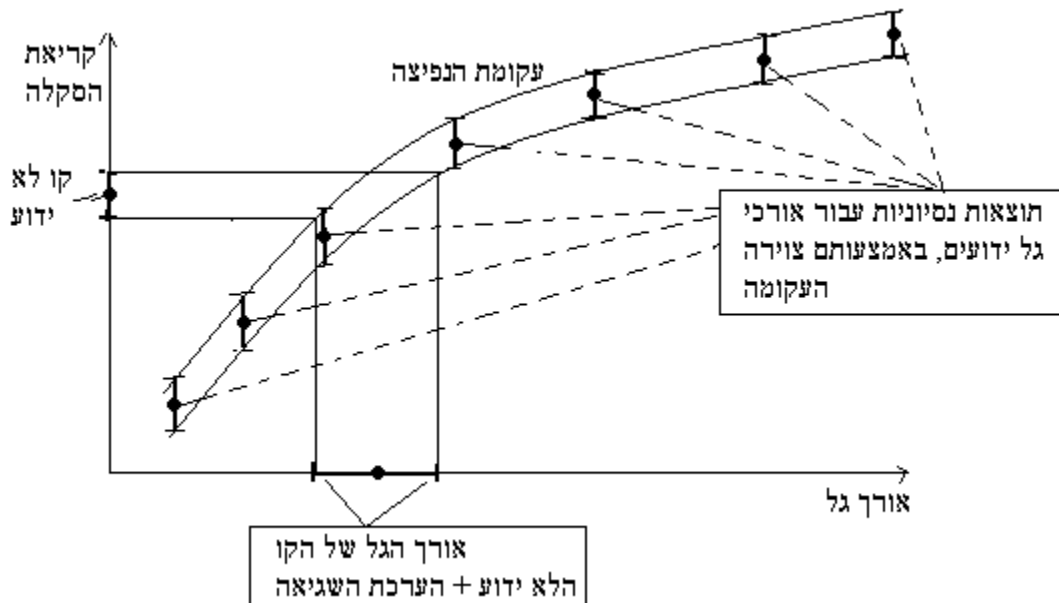
- ודא שכאשר  $\theta_1 = 0$  הנוסחה תהיה זהה לנוסחה (2).
- ב. עבור  $n=1$ , זוויות  $\theta_1 = \theta_2 = 30^\circ$  וגל בצבע אדום מצא את המרחק בין כל שני סדקים שכנים בסריג.
7. בניסוי במעבדה שלנו משתמשים בסרגל מעגלי, איך מחשבים את הזווית  $\theta$  ?  
 כעת משתמשים בסרגל ישר, איך ניתן לחשב את הזווית  $\theta$  ?



## 2. מהלך הניסוי

### 2.1 ספקטרוסקופ מנסרה

- כוון את סדק הקולימטור אל מנורת הכספית וצפה בקווי הספקטרום. הקטן את רוחב הסדק עד אשר כל צבע נראה כקו דק. זהה את הקווים וקבע את מקומם בסקלה. הערך את השגיאה במיקום הקווים.
- ערוך גרף כיול של אורכי הגל לפי קריאת הסקלה. העבר עקומה חלקה (לאו דווקא קו ישר) דרך נקודות הגרף. העקומה המתקבלת נקראת עקומת הנפיצה של הספקטרוסקופ, ולפיה אפשר למצוא את אורך הגל של קווי ספקטרום לפי מקומם בסקלה.
- על מנת להעריך את השגיאה, הוסף לכל נקודה בגרף את הצלב המתאר את השגיאה בכל מדידה. העבר בגרף הכיול את הקווים התוחמים את השגיאות במדידות, הערכת השגיאה באורך הגל עבור קריאת סקלה נתקבל ע"י הקווים שציירת. ראה ציור 7.



ציור 7: עקומת נפיצה עם הערכת שגיאה.

- כדי למצוא את אורכי הגל של אור הנפלט ממנורת הליום, כוון את סדק הקולימטור אל מנורת ההליום, ורשום את מקומם של קווי הספקטרום אשר ניתן להבחין בהם. מצא את אורכי הגל של קווים אלו בעזרת עקומת הנפיצה. הערך את השגיאה באורכי הגל והשווה את התוצאות עם ספקטרום ההליום.

## -ספקטרוסקופיה-

- החלף את המנורה לקדמיום ומצא באמצעות עקומת הכיול את אורכי הגל הנראים ממנורה זו.

### 2.2 ספקטרוסקופ סריג

- נתון לך סרגל מעגלי עליו רשום הרדיוס. הרכב את המערכת כך שפתח מנורת ההליום נמצא בקריאה 0 של הסרגל, קבע את הסריג במרחק של רדיוס מהמנורה, כוון את הסרגל כך שימצא על היקף מעגל ברדיוס הנתון שהסריג במרכזו.
- צפה דרך הסריג לעבר מנורת ההליום באופן שתבחין בעוצמה מקסימלית של המקור. באופן זה תוכל להיות בטוח שפוגע אור בעוצמה מספקת בסריג.
- קבע את מקומם של קווי הספקטרום שהנך רואה על גבי סרגל המונח ממול, הבחן בקווי הסדר ראשון ( $n = 1$ ), הסדר השני ( $n = 2$ ) והשלישי.
- שים לב: מדוע בסדר השני לא מופיע קו אדום ובמקומו מופיע קו סגול-ורוד? רמז: בסדר השלישי לא מופיע קו כחול...
- חשב את הזווית  $\theta$  של הקווים השונים.
- ערוך גרף של  $\sin\theta$  כנגד אורכי הגל  $\lambda$  (הנתונים לך בטבלה II) עבור כל סדר בנפרד, ומצא מתוך הגרף את  $a$ .
- קבע בעזרת הגרף את אורכי הגל של קווים נוספים שאינם מופיעים בטבלה.
- החלף את מנורת ההליום במנורת קדמיום ומצא את אורכי הגל הנפלטים ממנורה זו. השתמש בקבוע הסריג שחושב קודם.

### ניסוי נוסף

- החלף את הנורה הספקטרלית לנתרן וצפה דרך הסריג לעבר המנורה. בסדרים הגבוהים ניתן להבחין שהאור הצהוב של הנתרן הוא דובלט המורכב משני קווים קרובים, חשב את אורכי הגל שלהם.