

ספקטרוסקופיה

א. מילות מפתח

ספקטרוסקופיה, רמות אנרגיה אטומית, ספקטרומטר, סריג עקיפה, התאבכות, ספקטרום, נפיצה במנסרה, סדרת Balmer של מימן.

ב. מכשור

ספקטרומטר, סריג, מנסרה, מערכת מנורות מתפרקות.

ג. מבוא

ספקטרוסקופיה היא שיטת המחקר הבסיסית של רמות אנרגיה. במעבדה זאת נשתמש בשיטות ספקטרוסקופיות לחקור את רמות האנרגיה במימן. כאשר אטום עובר מרמת אנרגיה אחת לרמה אחרת הנמוכה ממנו, הוא פולט פוטון שהאנרגיה שלו, h
u, שווה להפרש בין שתי רמות אנרגיה אלה. מכיוון שרמות האנרגיה האטומיות הן בדידות, האור המוקרן מורכב מאורכי גל בדידים. תפקידו של הספקטרומטר הוא לפצל את האור לאורכי הגל המרכיבים אותו ולמדוד אותם. מידיעת אורכי גל אלה, אפשר לבנות את סולם רמות האנרגיה של האטום.

מדידות ספקטרוסקופיות הן מן המדידות המדויקות ביותר. אפילו במעבדה שלנו, אנו מצפים לאי-דיוקים פחותים מאחוז. להלן נתאר שתי שיטות ספקטרוסקופיות שונות בעזרת סריג ובעזרת מנסרה.

ג1. הספקטרומטר

המבנה הכללי של הספקטרומטר מתואר באיור 1. הוא כולל את האלמנטים הבאים:

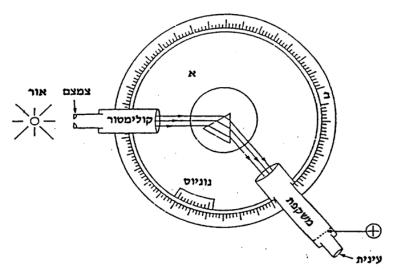
מקור האור: פולט את האור הנוצר על ידי מעבר האטום מרמה אחת למשנהו. בניסוי שלנו, המקור הוא מערכת של שפופרות התפרקות של הגזים מימן, הליום וכספית.

קולימטור: שתפקידו להוציא אלומת אור מקבילה. הוא כולל צמצם להצר את תמונת המקור כדי לקבל תמונה חדה וברורה. הסדק נמצא במוקד של עדשה המוציאה אלומה מקבילה. הקולימטור מחובר לבסיס הספקטרומטר.

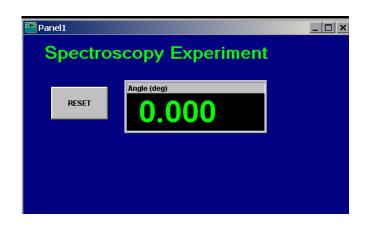
אלמנט הפרדה: הוא סריג או מנסרה, עליו נופלת האלומה היוצאת מן הקולימטור. ביציאה ממנו האלומה מפוצלת לרכיבים מונוכרומטיים. אלמנט ההפרדה נמצא על שולחן הספקטרומטר (א). שולחן זה ניתן לסיבוב ביחס לבסיס הספקטרומטר.

משקפת ניידת: המאפשרת סקירה זוויתית לאיתור קווי הספקטרום. במשקפת שתי עדשות: האוביקטיב והעינית. בין שתי עדשות הצלב. תפקיד האוביקטיב הוא ליצור בבואה של הסדק במישור של הצלב. המשקפת מחוברת ללוח (ב) שניתן לסובב ביחס לבסיס. המשקפת ניתנת לתזוזה עדינה ו/או דקה, לפי בחירתנו, על ידי בורגי כוונון הנמצאים על השולחן האופטי. במשקפת ישנה עינית המאפשרת מיקוד תמונת הסדק.

השולחן: בשולחן ישנה סקלה זוויתיות המחוברת למחשב . תוכנת המחשב מתרגמת את סיבוב המשקפת למעלות ומציגה את התוצאות על המסך ,ראה איור 2. בכל שלב אפשר לאפס את הזווית על ידי לחיצה על הכפתור RESET.

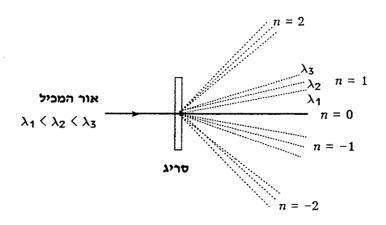


איור 1: מבנה הספקטרומטר



איור 2: מסך הממשק הממוחשב

ג2. סריג העקיפה



איור 3: פיצול אלומת אור על ידי סריג עקיפה

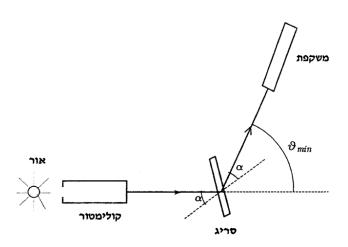
סריג עקיפה הוא רשת צפופה של סדקים. כאשר אלומת אור מונוכרומטית נופלת על סריג עקיפה, אזי מתקבלות מקסימה של אור בזוויות הסחה מסוימות כתוצאה של התאבכות. אם האור נופל בניצב על הסריג, אזי התנאי למקסימה אלה הוא:

$$d\sin\theta = n\lambda \qquad n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \tag{1}$$

גל ו-d המרחק בין הסדקים. n נקרא סדר העקיפה. האור מופרד לאורכי גל λ שונים כי הזוויות של המקסימה תלויות באורך הגל (פרט לסדר 0). באיור 3 מתוארת הפרדת אורכי גל, ומספר סדרים שונים.

התאבכות קיימת גם כאשר האור אינו נופל בניצב על הסריג, אולם אז התנאי לזווית ההסחה של מקסימום של אור אינו נתון על ידי הנוסחה (1), אלא בזווית בין כיוון האור הפוגע לבין הסריג. אפשר להראות כי זווית ההסחה של מקסימום מסוים היא מינימלית כאשר הסריג עומד בצורה סימטרית לגבי האלומה הנכנסת ואלומה (המוסחת) היוצאת. מצב זה מתואר באיור pprox מהניצב לסריג. זווית ההסחה היא lpha מהניצב לסריג. זווית ההסחה היא .4

$$\alpha = \frac{1}{2} \mathcal{G} \min \qquad (2)$$



איור 4: הזוית המינימלית בסריג

 \cdot הוא: n הואר מסדר מינימלית עבור מקסימום מסדר הוא:

$$2d\sin(\theta \min/2) = n\lambda \qquad n = 0,\pm 1,\pm 2,... \tag{3}$$

מדידת זווית ההסחה המינימלית המונעת את הצורך להציב את הסריג בניצב לאלומת האור, ובאופן עקרוני מדידתה מדויקת יותר.

ג3. נפיצה במנסרה

, שבירה השבירה השבירה השבירה תלויה במקדם השבירה אינו קבוע, שבירה אינו קבוע שבירת האור במעבר בין אוויר לתווך אחר תלויה במקדם השבירה השבירה אינו קבוע אלא תלוי באורך הגל: $n = n(\lambda)$. לכן, אור העובר במנסרה יופרד למרכיביו השונים אשר יעברו בזוויות שונות דרך המנסרה.

קירוב לתלות של מקדם השבירה של זכוכית, עבור אורכי גל בתחום האור הנראה, ניתן על ידי : הנוסחה הבאה

$$n(\lambda) \approx B + \frac{C}{\lambda^2}$$
 (4)

נוסחה זו נקראת נוסחת קושי והיא נוסחה אמפירית לקשר שבין מקדם השבירה לאורך הגל. כלומר, יש לבצע מדידות על מנת לחשב את המקדמים B,C המתאימים למנסרה הנתונה, ומקדמים אלו שונים עבור סוגי זכוכית שונים.

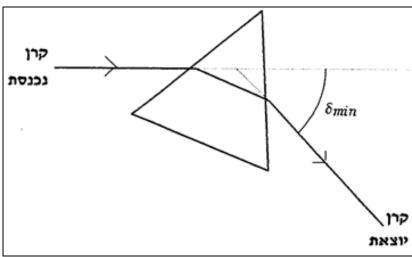
גם למנסרה קיימת זווית הסחה מינימאלית δ_{min} . זווית זו מתקבלת כאשר האור פוגע במנסרה ויוצא ממנה באופן סימטרי (ראה ציור 5). הקשר בין מקדם השבירה לזווית ההסחה המינימאלית עבור במנסרה משולשת מחושב באופן גיאומטרי וניתן על ידי:

$$n = 2 \cdot \sin\left(30^{\circ} + \frac{\delta_{min}}{2}\right) \tag{5}$$

לאחר פיתוח טור טיילור לסינוס ושימוש בנוסחה (4) ניתן לרשום בקירוב:

$$\delta_{min}(\lambda) \approx B' + \frac{C'}{\lambda^2} \tag{6}$$

לכן, כדי לכייל את המנסרה, נמדוד בניסוי את זווית ההסחה המינימלית עבור קווים של . ספקטרום ידוע ונחשב את המקדמים B', C' עבור המנסרה שבמעבדה



ציור 5: זווית ההסחה המינימאלית במנסרה

ג4. רמות אנרגיה באטום המימן

: באטום המימן נתונה על ידי הרמה n

$$E_n = Ry \frac{1}{n^2}$$
 $n = 1, 2, 3, ...$ (4)

1Ry = 13.6eV : נקרא המספר הקוונטי הראשי ו- Ry = 13.6eV נקרא המספר הקוונטי הראשי ו

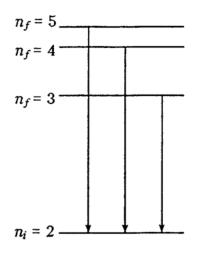
כאשר מעוררים את אטום המימן, למשל על ידי התנגשויות בשפופרת התפרקות, האלקטרונים מעוררים לרמות אנרגיה גבוהות יותר. ולאחר מכן, בירידתם חזרה לרמות הנמוכות יותר, הם פולטים אור באנרגיה השווה להפרש האנרגיה בין הרמות.

$$hv = Ry\left(\frac{1}{n_i^2} - \frac{1}{n_f^2}\right) \tag{5}$$

מתוך אורכי הגל הנפלטים האלו, רק חלקם נמצאים בתחום הנראה (400-700חשה). סדרת Balmer סדרת קווי הפליטה

$$n_i = 2$$
 ל - $n_f = 3, 4, 5, ...$

בסדרה זו לא כל הקווים נמצאים בתחום הנראה. באיור 6 מתואר סולם רמות האנרגיה המתאים לסדרה זאת.



Balmer סדרת H איור 6: סולם האנרגיות לאטום

ד. תאור הניסוי

בניסוי הנוכחי מתחילים עם נתון אחד ידוע בלבד, שהוא אורך הגל של קו ספקטרלי מסוים של כספית. מתוך נתון זה, קובעים את קבוע הסריג. לאחר מכן, מודדים את אורכי הגל של ספקטרום הליום בעזרת הסריג ומשתמשים בספקטרום זה לכייל את המנסרה. לבסוף מודדים את סדרת Balmer של מימן ומשווים לתיאוריה.

- א. מדידת קבוע הסריג. מודדים את זוויות ההסחה המינימליות במספר סדרי עקיפה של קו מדידת קבוע הסריג. מודדים את זוויות משתמשים בנוסחה (3) כדי לקבוע את הסריג d
- ב. **מדידת ספקטרום** He בספקטרום את זוויות ההסחה המינימליות בסדר לא בסדר עקיפה n=1 של הקווים בספקטרום He משתמשים בנוסחה (3) לקבוע את אורכי הגל של הספקטרום כאשר d הוא ידוע מחלק (א) של הניסוי.
- ג. כיול ספקטרומטר מנסרה עם ספקטרום .He מודדים את זוויות ההסחה $\delta_{min}\left(\frac{1}{\lambda^2}\right)$ מודים אר בעזרת מנסרה. משרטטים אוף בעזרת של קווי של קווי He בעזרת מנסרה. משרטטים אורכי גל בחלק (ב) של הניסוי ומחלצים את קבועי המנסרה (נוסחה δ).
- ד. מדידת ספקטרום מימן בספקטרומטר מנסרה. מודדים את זוויות ההסחה המינימליות בספקטרומטר מנסרה של קווי מימן. משתמשים בנוסחה (6) כדי לקבוע את אורכי הגל. בונים את סולם רמות האנרגיה במימן, ומשווים עם התיאוריה.

ה. שאלות הכנה

- היא בסריג הקווים בסריג אם אורך אורך אורך הקווים בסריג היא תצפו n תצפו חדרי עקיפה n כמה סדרי עקיפה mm 600
- נניח כי זווית ${\cal G}$ בסריג נמדדת בדיוק של ' $\pm \pm$. מהי השגיאה היחסית ב- λ הנגרמת על ידי שגיאה זו בזווית (הניחו " ${\cal G}=20$)?
 - 3. מיקום סדר העקיפה 0 בסריג אינו תלוי במצב הסריג ביחס לכיוון הקרן הפוגעת. מדועי
- 4. הוכיחו את נוסחה 3. הניחו כי מצב הסריג סימטרי לגבי האלומה הנכנסת והאלומה היוצאת.
 - מהו היתרון העיקרי של הסריג לעומת המנסרה! מה יתרונה של המנסרה מול הסריג!

ו. מהלך הניסוי

זהירות! מתחי הערור של שפופרת ההתפרקות גבוהים ומסוכנים.

יש לכבות את הספק כאשר מחברים או מחליפים שפופרת.

- המכשירים האופטיים עדינים ויקרים. אין לגעת במשטחים האופטיים: פני הסריג, מנסרה עדשות.
- עבדו בעדינות! יציבות המערכת היא תנאי לקבלת תוצאות טובות.

כיוון הספקטרומטר

- המנורה מול בשקע של 220 $\!V$. הציבו את מנורת האור הלבן. השתמשו בשקע של 220 $\!V$. במצם הקולימטור.
- 2. התבוננו בתמונת הסדק במשקפת. בבואת הסדק תמיד ממוקדת במישור של הצלב, אבל המרחק הנכון של מישור זה מהעינית שונה לכל צופה. כוונו את העינית כך שהצלב נראה ברור וממוקד.
- 3. כוונו את רוחב הסדק בעזרת הבורג הקטן בצד הקולימטור עד שתקבלו פס אור צר במשקפת (כ-1-3mm).
- 4. סובבו את הכפתור בצד המשקפת כדי למקד את תמונת הסדק עד שתקבלו תמונה ברורה ככל האפשר.
 - 5. הביאו את תמונת הסדק להתלכדות עם מרכז הצלב על ידי הזזת המשקפת.

א. מדידת קבוע הסריג

- 1. נתקו את מנורת האור הלבן. הדליקו את מנורת הכספית (Mercury **Hg**) והציבו את הספקטרומטר מול המנורה. כווננו בעדינות את מיקום הספקטרומטר מול המנורה כך שתמונת הסדק תהיה בהירה ככל הניתן.
- 2. הציבו את הסריג על שולחן הספקטרומטר. אפסו את הסקלה של המשקפת לפי האור המתקבל בסדר n=0. זווית n=0 מוגדרת להיות הזווית בה מתקבלת תמונת הסדק ללא כל הסחה (האור מבצע מסלול "ישר"). בדקו כי מיקום סדר n=0 אינו תלוי בזווית הסריג ביחס לקרן הפוגעת.
- 3. מצאו במשקפת את הקו הירוק של כספית. אורך הגל שלו הוא 546.074nm. מסובבים את הסריג, אזי הקו יזוז. למציאת זווית ההסחה המינימאלית, עקבו אחר תזוזת הקו במשקפת בזמן שאתם מסובבים את הסריג (לא מסובבים את השולחן האופטי!). סובבו

- את הסריג כך שהקו יתקרב לזווית °0. בזווית מסוימת, סיבוב נוסף **באותו** כיוון יגרום לתזוזת הקו במשקפת בכיוון **ההפוך**. זוהי זווית ההסחה המינימלית.
- n מדדו את זווית ההסחה המינימלית לקו הירוק של כספית עבור כל סדרי עקיפה . n=0 ביחס ל- n=0 שאתם רואים (עד ± 3). בדקו שהסדרים ± 1 סימטריים לסדרים
- d שרטטו גרף של n לעומת $\sin(\mathcal{G}_{\min}/2)$. השתמשו בנוסחה (3) כדי למצוא את ערך .5 משיפוע הגרף. השוו לערך הכתוב על הסריג.

ב. מדידות ספקטרום הליום בסריג

- 1. החליפו את המנורה למנורת הליום (Helium *He*). זהירות! ספק המתח צריך להיות כבוי בזמן ההחלפה.
- .2 מדדו את זוויות ההסחה המינימליות בסדר $n=\pm 1$ לכל הקווים שאתם רואים בבירור. אם אינכם רואים לפחות 10 קווים באורכי גל שונים, הרחיבו מעט את הסדק.
 - (3) חשבו את אורכי הגל לפי נוסחה (3) והשוו עם אורכי הגל הרשומים בטבלה 1 (עמי 3).

ג. כיול המנסרה

- 1. החליפו את הסריג במנסרה. כדי להבין כיצד למקם את המנסרה, התבוננו בציור 1. כפי שמתואר בציור זה, קודקוד אחד של המנסרה נמצא בכיוון הקולימטור. סובבו את המנסרה עד שתמצאו את הקווים שמפוזרים ממנה.
- 2. לאחר שמצאתם את הקווים, סובבו את המנסרה בעדינות והביאו את הקווים להסחה מינימאלית. קבעו את המנסרה בעזרת הבורג בשולחן הספקטרומטר. מרגע זה **אין להזיז את המנסרה** וכיול המנסרה יתבצע עבור הזווית המסויימת בה היא ממוקמת. כל הזזה של המנסרה תפגע בכיול.
- מדדו את זווית ההסחה שמתקבלת במנסרה (δ_{min} לכל קו הליום שמדדתם בסריג. יש להתעלם מהקווים שלא הצלחתם למדוד בסריג.
 - B',C' שרטטו גרף כיול לינארי בהתאם לנוסחה (6) ובצעו רגרסיה למציאת המקדמים A

ד. מדידת ספקטרום מימן בספקטרומטר מנסרה

- 1. הדליקו את מנורת מימן (Hydrogen H). בתחתית ספק המתח יש מפסק המסומן Hydrogen שתפקידו לשמור על מנורת המימן. בזמן העבודה הרגילה, עוצמת אור המימן צריכה להיות קטנה, ולשם כך, המפסק צריך להיות במצבו התחתון. בזמן מדידת קו כשדרוש אור חזק מעלים את המפסק למצבו העליון—לזמן קצר בלבד!!!
- 2. מקמו את הספקטרומטר מול מנורת המימן. הקפידו לא להזיז את המנסרה בשלב זה, אחרת יהיה צורך לבצע כיול מחדש.
- 3. מדדו את זוויות ההסחה לכל הקווים שאתם רואים. סדרת Balmer מכילה ארבעה קווים בתחום האור הנראה. קווים אחרים שייכים לספקטרום המולקולרי, והם בדרך כלל חלשים יותר וצפופים. אם אינכם מזהים 4 קווים חזקים בבירור, פנו למדריך.
 - 4. מצאו את אורכי הגל לקווים שמצאתם על פי נוסחה (6).
 - .5 ציירו את סולם רמות האנרגיה של מימן התורמות לסדרת Balmer, וזהו את המעברים.
- ארבעת ארבעת הממוצע של ארבעת הערך הסופי הוא לכל אחד לכל אחד מהמעברים. הערך הסופי הוא הממוצע של ארבעת $R_{\rm y}$ הערכים. השוו לערך המקובל בספרות.

טבלה 1. אורכי הגל של ספקטרום ההליום.

עוצמה יחסית	מספר הקו	nm אורך גל	צבע
1450	1	706.52	אדום
1850	2	667.82	אדום
7100	3	587.56	צהוב
860	4	504.77	ירוק
3106	5	501.57	ירוק
1800	6	492.19	ירוק
370	7	471.31	כחול
2220	8	447.15	כחול
590	9	438.79	סגול
210	10	414.38	סגול
480	11	412.08	סגול
1450	12	402.62	סגול
2100	13	396.47	סגול

<u>ראה גם נספח 1 בהמשך</u>

DESCRIPTIONS OF SPECTRA

Model 4605 HYDROGEN (H ₂ gas). Strong violet, blue and red lines are obvious, although others		NITROGEN (Continued)		
may be seen.			Violet	4400
	Color	Wavelength, Å	Violet	4450
			Blue	5000
	Violet	4200	Blue	5050
	Violet	4400	Blue	5200
	Blue	4900		
	Red	6700	Green	5300
	Red	6700	Green	5400 5500
	1104	0700	Green Green	5600
Model	4617 DEUTE	RIUM (isotopic variant of		
H ₂). Spectrum is the same as for H ₂ , unaffected by			Yellow	5800
neutron.		2-	Yellow	5850
	Color	Wavelength, Å	Yellow	5900
	Violet	4200	Red	6000
	Violet	4400	Red	6150
			Red	6200
	Blue	4900	Red	6250
	Red	6700	Red	6300
			Red	6350
Model	4604 HELIUM	(He gas). Strong spectrum	Red	6400
with 2 violet, 2 green, 1 yellow and 2 red lines being prominent.			Red	6450
			Red	6500
			Red	6600
	Color	Wavelength, Å	Red	6700
	Violet	4000	Red	6750
	Violet	4000	Red	6800
	Violet	4000	Red	6850
	Blue		M-1-1 ((10 0373/0	EN (O) W
	Blue	4500 4550	Model 4610 OXYG	
	Blue	4550		let, blue/violet, green and red
	Blue	4800	(2 lines) regions.	
			Color	Wayalanath Å
	Green	5000		Wavelength, Å
	Green	5100	Violet	4400
	Yellow	5850	Violet	4400
	Red	6500	Blue	4900
	Red	6800	Green	5250
	Red	7200	Green	5400
	****	,200	Green	5400
Model 4609 NITROGEN (N2 gas). Strong			Green	5500
spectrum of many lines from violet to red.		Green	5650	
*	,			0.000
	Color	Wavelength, Å	Red	6150
	Violet	4000	Red	6250
	Violet	4050	Red	6600
	Violet	4100	Red	6650
	Violet	4150		
	Violet	4200		
	Violet	4250		

ח. ספרות עזר

- P.A Tipler, Modern Physics, p.131-133
- C. Garrod, Twentieth Century Physics, p.79-81, p.175
- A.P. Arya, Elementary Modern Physics, Chapter 5
- Wall, Levine & Christensen, Physics Laboratory Manual, p. 374-377, p.347-348